

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Zvýšení jakosti u slitiny AlMg3
procesem vícenásobné plastické
deformace**

Quality Enhancement of AlMg3 Alloy
by Severe Plastic Deformation Proces

Student: Petra Vepříková

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.

Zadání bakalářské práce

Student:

Petra Vepříková

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Zvýšení jakosti u slitiny AlMg3 procesem vícenásobné plastické deformace
Quality Enhancement of AlMg3 Alloy by Severe Plastic Deformation Proces

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši v současné době nejvíce využívaných metod výroby ultra-jemnozrnných materiálů.
2. Uveďte metody matematické simulace využívané při analýze tvářecích procesů.
3. Proveďte protlačení slitiny AlMg3 metodou DRECE s využitím procesu SPD.
4. Proveďte analýzu vlivu počtu průchodů tvářecím nástrojem na velikost mechanických i tvářecích vlastností.
5. Proveďte metalografickou analýzu.
6. Uveďte celkové vyhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

Valiev, R., Z., Zhilyaev, A., P. and Langdon, T. G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications, [Warrendale]: TMS; Hoboken: Wiley, c2014

Rusz, S., Dutkiewicz, J., Faryna, M., Maziarz, W., Rogal, L., Bogucka, J., Malanik, K., Kedron, J., Tylsar, S. SEM, EBSD and TEM structure studies of α -brass after severe plastic deformation using equal channel rolling followed by groove dressing. *Solid State Phenomena* 2012, 186, p. 94-97

Lee, J. C., Seok, H. K., HaJ., H., and Chung, J. Y. Controlling the textures of the metal strips via the continuous confined strip shearing (C2S2) process, *Mater. Res. Bull.*, 2001; Vol. 36, p. 997 - 1004

Lee, J. C., Seok, H. K. and Suh, J. Y. Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous equal channel angular pressing, *Acta Mater.* 2002, Vol. 50, p. 4005 - 4019

Cheng, Y. Q., Chen, Z. H. and Xia, W. J. Drawability of AZ31 magnesium alloy sheet produced by equal channel angular rolling at room temperature, *Mater. Charact.*, 2007, Vol. 58, p. 617 - 622

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědoma, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen „autorský zákon“), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (školní dílo),
- beru na vědomí, že Vy vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Petra Vepříková

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Na Příkopech 4, Mohelnice 789 85

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VEPŘÍKOVÁ, P. *Zvýšení jakosti u slitiny AlMg3 procesem vícenásobné plastické deformace: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2019, 47 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Stanislav Ruzs, CSc.

Bakalářská práce se zabývá metodou DRECE a jakostí u slitiny AlMg3.

V první části jsou uvedeny nejnovější technologie při výrobě ultra-jemné struktury, kde je upřesněna metoda DRECE. Materiál, který je protahován, bude simulován v programu SimufactForming, je sepsán popis a postup práce v tomto softwaru.

Dále je protahován plech s ultra-jemnozrnnou strukturou tvářecím zařízením pomocí metody DRECE. Bude zjištěno, jaký má vliv více průtahů na materiál, dále změna mechanických a tvářecích vlastností. Na konci je vyhodnocení metalografické analýzy, poté zhodnocení celé bakalářské práce a dosažených výsledků.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

VEPŘÍKOVÁ, P. *Quality Enhancement of AlMg3 Alloy by Severe Plastic Deformation Proces: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of mechanical technology, 2019, 47 p. Thesis head: prof. Ing. Stanislav Ruzs, CSc.

Bachelor thesis is dealing with method DRECE and *increase quality in alloy AlMg3*.

In the first part, there are listed the latest manufacturing technology with ultrafine structure, where is method DRECE clarified. Material, which is stretched, is simulated in program SimufactForming, there is written description and workflow in this software.

In the next section is stretched metal plate with ultrafine structure by a forming device with method DRECE. It will be found out how more passes through the forming device have influence on material, the next is change of mechanical and forming properties. At the end is an evaluation of metallographic analysis, after the evaluation of the whole bachelor thesis and achieved results.

Obsah

Úvod	5
1 Nejvíce využívané metody výroby ultra-jemnozrnných materiálů v dnešní době	8
2 Matematická simulace pro tvářecí procesy	10
2.1 SimufactForming	10
2.1.1 Představení SimufactForming	11
2.1.2 Předzpracování	16
2.1.3 Zpracování	19
2.1.4 Pokročilá technika modelování	22
2.1.5 Kontrola a kalibrování simulace	22
3 Protlačení slitiny AlMg3 metodou DRECE při analýze tvářecích procesů	23
3.1 Základní technologické parametry	23
3.2 Postup protlačování	24
3.3 Protlačování slitiny AlMg3	24
3.3.1 Vliv počtu průchodů plechu tvářecím zařízením na mechanické vlastnosti	24
3.3.2 Vliv počtu průchodů na velikost tvrdosti HV10 u slitiny AlMg3	26
3.3.3 Analýza vlivu velikosti tlaků přítlačných válců na velikost tvrdosti HV10	27
3.3.4 Vliv tepelného zpracování na velikost tvrdosti po 6. průchodu tvářecím zařízením	28
3.3.5 Analýza průchodu při maximální rychlosti	28
4 Analýza vlivu počtu průchodů tvářecím zařízením na mikrotvrdost u výchozího stavu materiálu a po 1. průchodu tvářecím zařízením	29
5 Metalografická analýza	34
6 Závěr, vyhodnocení dosažených výsledků	41

Seznam použitých značek a symbolů:

A	Tažnost	[%]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	Síla	[N]
HV	Tvrdość dle Vickerse	[-]
Re	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[MPa]
T	Teplota	[°C]
U	Napětí	[V]
v_{pr}	Rychlost protlačování	[mm · s ⁻¹]
θ_{AV}	Chybná odchylka	[°]

Seznam použitých zkratek:

ARB	<i>Accumulative Roll Bonding</i> , vícenásobné dělení a válcování
CAD	<i>Computer-aided design</i> , počítačem podporované projektování
CCDC	Cyklické přechování v rovnostranném kanále
CEC	Cyklické protlačování a přechování
CGP	Lisování do drážek
CONFORM	<i>Continuous Extrusion Forming</i> , kontinuální protlačování
DCAP	<i>Dissimilar Channel Angular Pressing</i> , protlačování rozdílným pravoúhlým (nerovnostranným) kanálem válcováním
DRECE	<i>Dual Rolling Equal Channel Extrusion</i> , protlačování kanálem s dvěma přitlačnými válci
EBSD	<i>Electron Backscatter Diffraction</i> , metoda difrakce zpětně odrážených elektronů
ECAP	<i>Equal Channel Angular Pressing</i> , protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem
EU	Evropská unie
HAG	Vysoko-úhlová zrna (zrna s vysokým úhlem)
HPT	Vysokotlaké torzní kroucení
LAG	Nízko-úhlová zrna (zrna s nízkým úhlem)
OIM	<i>Optical Impulse Modulation</i> , mikroskopie s orientačním zobrazením
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i> , skenovací elektronové mikroskopie
SPD	Vícenásobná plastická deformace
UFG	Ultra-jemnozrnné materiály
2D	Zkratka výrazu „dvoudimenzionální“, „dvourozměrný“, lze popsat 2 rozměry
3D	Zkratka výrazu „trojdimenzionální“, „trojrozměrný“ a lze popsat třemi rozměry

Úvod

Výzkumem a technologií výroby UFG materiálů a nanomateriálů se v současnosti zabývá mnoho vědeckých a výzkumných pracovišť průmyslově vyspělých zemí. Je zkoumáno několik principů technologických postupů, jejich vliv na mikrostrukturu materiálu, vliv provozních podmínek na proces.

Z nich lze uvést nejznámější:

- ECAP – protlačování rovnostranný pravoúhlým kanálem s výstupem ve tvaru hranolu,
- DCAP – protlačování rozdílným pravoúhlým kanálem válcováním,
- CCDC – cyklické pěchování v rovnostranném kanále,
- CEC – cyklické protlačování a pěchování,
- CONFORM – kontinuální vytlačování otvorem,
- ARB – vícenásobné dělení a válcování,
- CGP – lisování do drážek apod.

Všechny výzkumy týkající se těchto technologií jsou ve stavu základního i aplikovaného výzkumu, ověřuje se jejich možnost zavedení do průmyslové praxe ve vytypovaných odvětvích průmyslové výroby. Jednotným trendem vývojových prací, bez ohledu na sledovanou technologii, je optimalizace procesu pro získání co největšího objemového množství zpracovávaného materiálu, v kombinaci s možností uplatnění použité technologie v provozní praxi – kontinuálním výrobním procesu. Tohle směřování je nejen logické, ale velmi žádoucí, má-li dojít k všeobecné expanzi UFG materiálů

Vývoj materiálů s ultra-jemnou strukturou neboli nanostrukturálních materiálů patří v současnosti k předním oblastem výzkumu materiálů a tvářecích technologií na celém světě. Daná problematika je jedním z nosných témat 7. rámcového programu EU. Podstata procesu spočívá v docílení velikosti zrna u zkoušeného materiálu pod $1\ \mu\text{m}$. Již dnes se dá dobře předpovědět, že řada mikrosystémů bude mít v budoucnu hybridní formy, které budou směsí nano-mikro a makropřesných technologií. Během posledních let je prováděn výzkum nanotechnologií ve vysokém tempu, poněvadž tyto bezprostředně ovlivňují vývoj nových materiálů a následně výrobků. Jejich technologický a obchodní světový přínos bude v budoucnu hlavní ekonomickou silou rozvoje moderní výroby.

Submikrokrytalické materiály s průměrnou velikostí zrna od 50 do 200 nm se vyznačují velmi vysokou tvářitelností při zachování velmi dobrých pevnostních vlastností.

Významná část prací současných vědeckých středisek se věnuje problematice zpevňování v průběhu procesu plastické deformace.

Praktický aspekt daného procesu je vázán na možnost zvýšení zatížení přenášených konstrukčními prvky vyráběnými z nanostrukturních materiálů a zároveň se zvýšením bezpečnosti při jejich zatěžování většími silami od sil uvažovaných při jejich konstrukčním návrhu.

Pomineme-li sporadické zmínky o mikrotvrdosti HV, jsou dosažené experimentální výsledky deformace dosud vesměs hodnoceny jen na základě mikrostruktury (resp. nanostruktury), byť pomocí transmisní elektronové mikroskopie. Prováděný materiálový výzkum je nutno více rozšířit do oblasti klasického zkušebnictví a vyvinout nový způsob a metodiku měření a vyhodnocování vyrobených polotovarů.

Vidina hmotnostně odlehčených kovových konstrukcí, strojů a stavebních prvků se zvýšenou životností i bezpečností, např. vysoko-pevnostních karoserií automobilů se schopností absorbce nárazové energie deformací bez porušení celistvosti, se jeví nejen lákavá, ale i žádoucí.

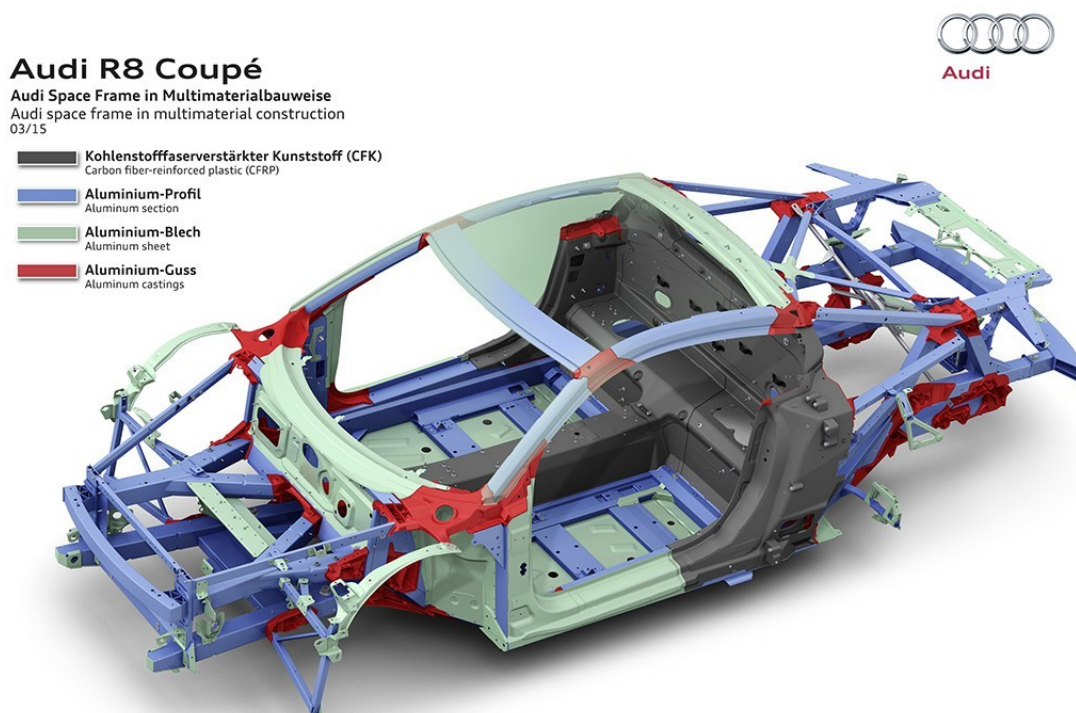
Zřejmě i proto se pozornost vědeckého a technologického výzkumu v hutnictví a materiálovém inženýrství na celém světě začíná více obracet na fyziku kovů, stavu jejich struktury a vlastností ve fázi pevné – krystalizaci, atomovou skladbu, meziatomární poměry a síly, submikrostrukturu, poruchy mřížky, její uzdravování atp. Experimentální výsledky řady renomovaných pracovišť naznačují, že při vysokém stupni deformace dosaženým vícenásobným tvářecím procesem lze vyrobit materiály s mimořádnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, technologicky využitelnými k výrobě extrémně namáhaných součástí či konstrukcí. To samozřejmě směřuje ke snížení jejich hmotnosti. Ukazuje se, že tato cesta výzkumu a možného realizačního využití dosažených výsledků, je velmi nadějná. Je prezentována jako budoucnost technického rozvoje lidstva.

Nicméně řada jevů a vztahů, podmínek a důsledků působení vnitřních a vnějších sil v mikrostruktuře potenciálně vhodných kovů, podrobených vícenásobné deformaci extrémními tlaky, není ještě zdaleka a dostatečně prozkoumána. Než bude možno přikročit k jejich technologickému využití v materiální výrobě, je nutno rozšířit objektivní poznání nejen pomocí studia všech dostupných informací, ale především prokázat a potvrdit je experimentálním výzkumem. Z doposud zveřejněných výsledků vědeckého výzkumu v této oblasti, výrobky z kovových nanomateriálů se nevyskytují nikde na světovém trhu.

Vysoká deformace u relativně nízkých homologických teplot je efektivní metodou výroby ultra-jemnozrnných masivních materiálů. Jsou analyzovány změny struktury, vlastností a potenciální použití těchto nových materiálů. U mnoha technických procesů přetváření jsou deformace podstatně větší než při tahové zkoušce. Jako skutečně dobrý se dosud jeví vývoj struktury při velmi vysoké deformaci a relativně nízkých teplotách, při kterých vznikají tyto nové mikrostruktury. Také dosažení vysoké deformace se u vysoce pevných

materiálů stává vždy těžší. U kovů a vrstvených materiálů se jedná o to, aby se pevnost nestupňovala na úkor tvárnosti.

Významné světové automobilky jako Opel, Audi, Jaguar, Ford, Fiat, Volvo, Toyota přistoupily v současné době k vývoji zcela nové koncepce malolitražního automobilu s vysokým podílem Al a jeho slitin. Jako základní, výchozí polotovary jsou používány slitiny Al, Cu a Mg s ultra-jemnozrnnou strukturou, jejichž vývoj je uskutečňován pomocí nových vícenásobných tvářecích technologií využívajících vysokého stupně deformace. Dalšími materiály, které jsou v současné době ověřovány, jsou tzv. UFG oceli (dvofázové oceli nízko a středně uhlíkové), které dosahují až dvounásobné meze pevnosti a zároveň vysoké tažnosti. Daná ultra-jemnozrnná struktura u výchozího materiálu vede k podstatnému zvýšení plasticity s možností tvářet obtížně tvářitelné materiály v podmínkách tzv. „superplastického stavu“. Dosažení požadované struktury je závislé především na teplotně-deformačních a napěťových podmínkách tvářecího procesu, cestě deformace geometrii nástroje, počtu průchodů, dosažené velikosti a rychlosti deformace a mazacích podmínkách.



Obrázek 1 – Rám automobilu Audi, který byl vyráběn převážně z hliníku a jeho slitin [9]

1 Nejvíce využívané metody výroby ultra-jemnozrnných materiálů v dnešní době

Výroba ultra-jemných (UFG) materiálů patří v současné době k předním oblastem výzkumu a vývoji tvářecích technologií na světě. UFG materiály jsou nový a aktuální způsob zlepšení jakosti kovů a slitin pro pokročilou konstrukční a funkční aplikaci.

UFG materiály lze vyrábět intenzivní plastickou deformací. Několikanásobná (SPD) plastická deformace (SPD) je účinná technologie vedoucí ke zlepšení mechanických i fyzikálních vlastností kovových materiálů pomocí zjemnění nebo dislokačního zpevnění struktury. Materiály, které jsou vyrobeny procesem SPD, mohou mít kromě UFG struktury také určité nanostrukturní funkce, jako jsou nerovnovážné hranice zrn, nano-dvojčatění, segregace hranic zrn a nanočástice. To způsobuje vytvoření nových a speciálních vlastností, včetně zvýšených vlastností (elektrické, magnetické, korozní či mechanické). Nejvíce rozvíjející se techniky SPD jsou vysokotlaké torzní kroucení (HPT) a protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem (ECAP).

Jedním z obvyklých způsobů je příprava materiálů s ultra-jemnou strukturou se střední velikostí zrna pod $1\text{ }\mu\text{m}$. U těchto materiálů se předpokládá dosažení zvýšených mechanických vlastností, které překonávají vlastnosti v současné době klasicky vyráběných stejných materiálů. Využití těchto materiálů je například tam, kde při využití vysoké pevnosti, při zachování určité požadované plasticity, má za následek nižší hmotnost konstrukce. To využijeme například v automobilovém, leteckém a vojenském průmyslu, jak rovněž i v lékařství (př. zubní implantáty).

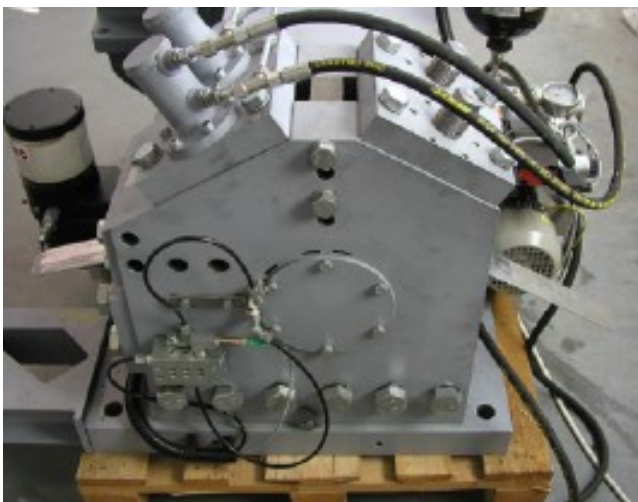
Další metodou může být metoda CONFORM neboli kontinuální protlačování, využívá proces SPD pro plynulé protlačování dutých i plných profilů či práškových materiálů. [3.2] Byla původně vyvinuta pro plynulé vytlačování, ale na základě problémů s opotřebením nebyla použita. Na tuto metodu se nyní opět navázalo a opakovaným použitím se zkouší dosáhnout velmi vysokého stupně deformace [2]

Metodou, s kterou se zabývám v bakalářské práci, je metoda DRECE. Je založena na protlačování pásu plechu tvářecím zařízením. Tvářecí zařízení pro metodu DRECE se skládá ze vstupní části, hlavního podávacího válce a dvou přítlačných hydraulických válců (přední a zadní) s regulací přítlačné síly, z nichž první válec je na vstupu a druhý je umístěn před zónou deformace a děleného tvářecího nástroje. Dále se skládá z mezikusu, převodovky typu Nord s elektrickým motorem, lamelové spojky, stavěcího šroubu pro stanovení mezery mezi tvářecími nástroji, vytahovací hydraulické čelisti, spodního a horního držáku nástroje a z nosných bočních desek.

Cílem je dosažení zjemnění zrna, dále potřebného zvýšení mechanických vlastností (zejména R_e) a zachování potřebné tažnosti (plasticity) procesem vícenásobné plastické deformace (SPD).



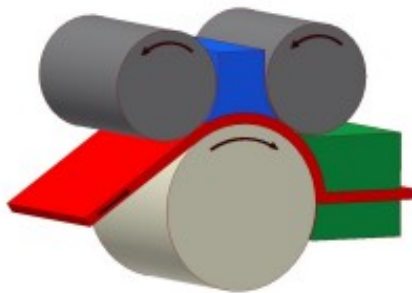
Obrázek 1.1 – Zařízení pro metodu DRECE – technologie protlačování pásu plechu pro dosažení vyšších mechanických vlastností bez změny tloušťky [1]



Obrázek 1.2 – Prototypové zařízení DRECE pro protlačování pásu plechu [2]



Obrázek 1.3 – Čelní pohled na zařízení DRECE [2]



Obrázek 1.4 – Grafický princip tvářecího zařízení metodou DRECE pro protlačování pásu plechu [2]

2 Matematická simulace pro tvářecí procesy

Matematická simulace je simulace, při níž je základem počítačový program, který simuluje model určitého tvářecího procesu. Pro konkrétní matematickou simulaci je třeba navrhnout tvar a geometrii tvářecího nástroje. Dále navrhnout tvar, rozměry a zadefinovat vlastnosti materiálu zkušebních vzorků. Experimentálně určit základní tvářecí parametry a definovat okrajové podmínky tvářecího procesu.

Pro simulaci protlačování slitiny AlMg3 metodou DRECE se může použít několika programů. Příkladově se jedná o softwaru *DEFORMTM*, *QForm* či *SimufactForming*. [3] [4]

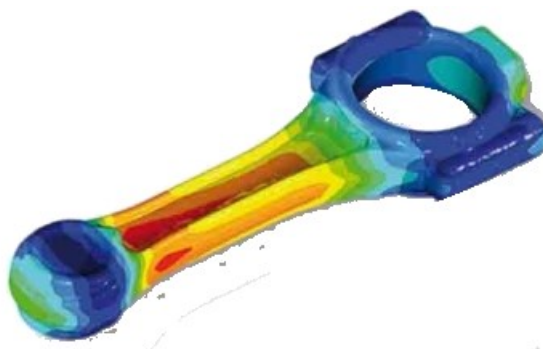
2.1 SimufactForming

Počítačovým softwarem, na který se v této bakalářské práci zaměřím, je *SimufactForming*, který analyzuje procesy na principu konečných prvků. *SimufactForming* je vylepšený nástupce softwarů *SuperForm* & *SuperForge*. Výpočty samotné simulace určují pro každý okamžik procesu rozložení teploty, deformace, napětí a toku tvářeného materiálu. Také lze určit namáhání nástrojů a průběh celkových tvářecích sil. [4]

SimufactForming využívá simulaci pro různé obory strojírenství. Například se může simulovat svařování materiálů v *SimufactWelding – welding simulation*.

V této bakalářské práci se konkrétněji zaměřuji na program *SimufactForming*, který se využívá v simulacích technologií tváření materiálu. V daném programu je možné simulovat tváření různých typů materiálu, zahrnuje tváření za studena, tváření za tepla, lisování, válcování, či otevření tvářecího nástroje. Jako přídatné simulace jsou například tlakové svařování, mechanické propojení nástrojů se zařízením nebo tepelné zpracování. Simulaci tváření v tomto softwaru lze rozdělit do tří hlavních skupin, které jsou potřebné pro každou simulaci, a to předzpracování (práce v programu *CAD*, definice materiálu, počáteční a konečné podmínky, kinematika), řešení neboli výpočty (řešení $u = K^{-1} F$,

výpočty napětí, sily, celkový ekvivalent plastického napětí). Dále i finální dosažené výsledky (struktura materiálu po tváření, rozložení intenzity deformací, intenzity napětí a teplot). *SimufactForming* kombinuje všechny tři skupiny v jednom programu. [6]



Obrázek 2.1 – Příklad vytvoření modelu a jeho simulace
v softwaru *SimufactForming* [10]

2.1.1 Představení *SimufactForming*

Simulace

Simulace vytváří systém s dynamickými procesy v experimentálním modelu, a následně dává podklady pro provedení vlastních experimentů. V samotné simulaci lze zjistit vlastnosti materiálu, které mohou být jak požadované, tak nepožadované a tímto optimalizovat experimentální proces i výrobní technologii užívanou v praxi.

Základem každého tvářecího procesu je definice vlastní tvářené součásti. Je nutno definovat materiál součásti, a to konkrétně vlastnosti materiálu – jeho mechanické a fyzikální vlastnosti ap. Tyto vlastnosti jsou spojené se vstupními daty o materiálu součásti. [6]

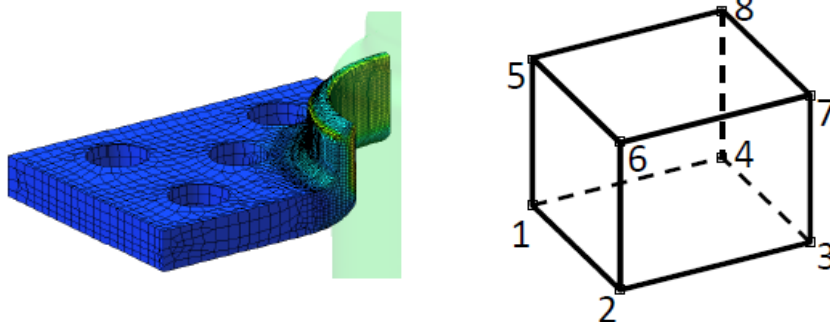
Technologie řešení – konečné prvky

Metoda konečných prvků je numerická metoda sloužící k simulaci průběhu napětí, deformací, proudění tepla atd. na vytvořeném simulovaném modelu. Princip je založený na diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. [5]

Touto metodu je standardně řešena většina tvářecích simulací.

Metoda konečných prvků je založena na řešení pomocí MSC (Marc solver). Toto nelineární řešení konečných prvků je vysoce produktivní, víceúčelové a efektivní.

SimufactForming umožňuje 4 prvky pro 2D simulace a čtyřstěnné nebo šestistěnné prvky pro 3D simulace. Pokud je potřeba co nejpřesnějších výsledků simulace, jsou vždy voleny šestistěnné prvky. [6]



Obrázek 2.2 – Rozložení simulované součásti na elementární prvky [6]

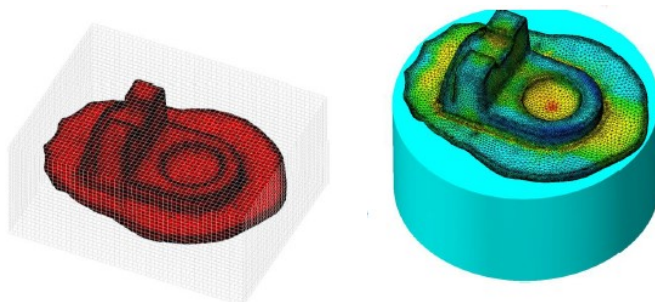
Technologie řešení – konečné objemy

Metoda konečných objemů je založena na řešení pomocí MSC (Marc solver). Pomocí tohoto řešení lze dobře předurčit tečení materiálu. Tato metoda v *SimufactForming* je speciálně navržena pro tváření za tepla, není doporučována pro jiné tvářecí procesy.

Charakteristiky tváření za tepla vyhovují požadavkům metodě konečných objemů:

- Vysoké teploty – nízká hodnota napětí, materiál lehce teče
- Vysoké napětí – pohyb dynamického materiálu, krátké časy procesů
- Omezený pohyb materiálu přes kovací zápustky – pouze málo volného pohybu

Klasické aplikace jsou kování za tepla nebo protlačování za tepla. [6]



Obrázek 2.3 – Simulovaná součást řešená pomocí metody konečných objemů [6]

Aplikační moduly

Po volbě nového projektu je vybrání aplikačního modulu první krok ve vytvoření nové simulace. *SimufactForming* obsahuje mnoho aplikačních modulů (tváření za studena, válcování nebo tlakové svařování), které se vyberou dle požadované simulace a procesu. Každý aplikační modul obsahuje individuální nastavení (od řešení po odlišné typy procesů). V dolní části okna se nachází stručný popis, který pomůže vybrat správný aplikační modul pro určitou simulaci. Po vybrání určitého aplikačního modulu se stiskne tlačítko OK.

Poté následuje definice procesu, kde se vybírá forma tváření (typ procesu). [6]



Obrázek 2.4 – Vybrání aplikačního modulu pro simulaci [6]

Typ simulace: 2D nebo 3D

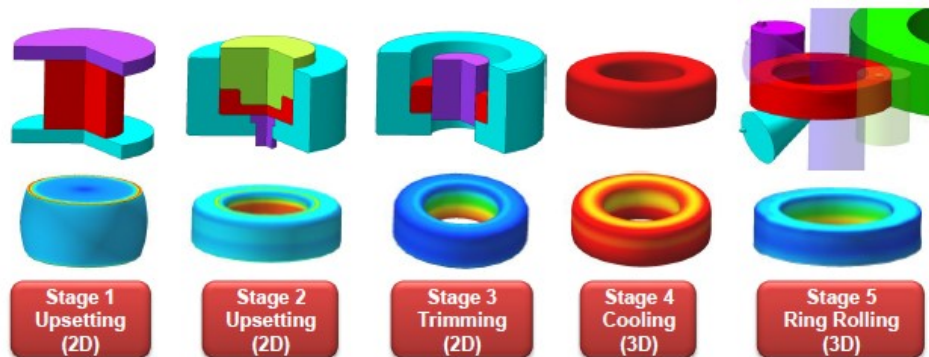
Po výběru aplikačních modulů, se zobrazí okno, kde je nutno definovat, typ procesu (viz kapitola 3.1.4). Vybírá se z procesů, které jsou zobrazeny na obrázku 2.4.

S tím souvisí, zda se bude simulovat ve 2D nebo 3D. Následuje tedy výběr v okně definice procesu.

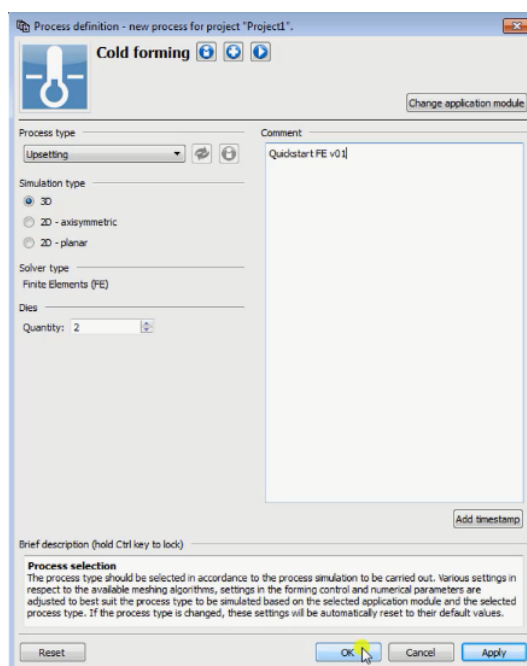
2D axisymetrická simulace (osově symetrická) může být použita například pro protlačování. 2D planární simulace (rovinné simulace) jsou vhodné většinou pro válcovací operace. Plné 3D výpočty jsou tvořeny pro komplexní geometrii součástí.

SimufactForming podporuje transformované výsledky z 2D do 3D simulace. 2D simulace nastavujeme s 3D geometrií, která může být později přeměněna. Není třeba generovat speciální 2D geometrii v CAD systému.

Po volbě definice procesu se zvolí OK. [6]



Obrázek 2.5 – Typ procesu [6]



Obrázek 2.6 – Definice procesu [6]

Popis prostředí *SimufactForming*

Při práci v *SimufactForming* je třeba se zorientovat v základní obrazovce.

Popis:

- 1: Lišta menu – lze vybrat z nabídky nabízených možností.
- 2: Panel nástrojů – nabídka možností s rychlým přístupem.
- 3: Strom procesů – zde můžeme vidět strukturu projektu a procesy.

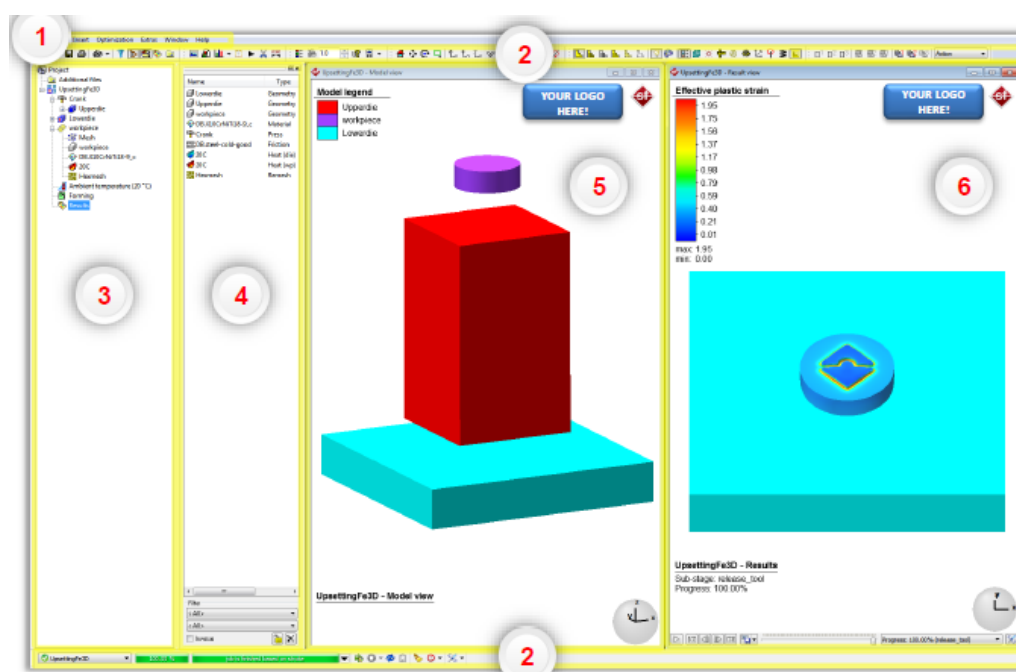
K vytvoření simulace se zaplní strom procesů objekty. Strom procesů obsahuje další položky, které nejsou komponenty ani objekty – je to například okolní teplota a kontrola tváření.

4: Katalog objektů – obsahuje každý objekt, který byl použit v projektu.

SimufactForming je založen na práci s objekty, objektem může být cokoli od geometrických tvarů, materiálů, až po fyzikální vlastnosti. Lze přesouvat objekty z katalogu objektů do komponentů ve stromě objektů. Jeden objekt může být zároveň použit ve více procesech.

5: Pohled na model – zobrazují se zde kompletní simulace.

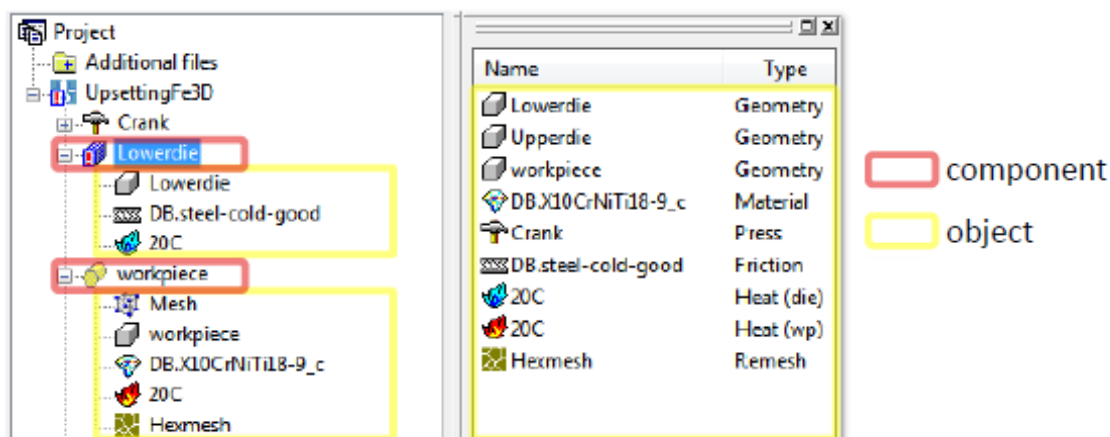
6: Pohled na výsledky – zobrazují se zde výsledky simulace.



Obrázek 2.7 – Popis pracovního prostředí [6]

Rozdíl mezi komponentem a objektem:

Typickým komponentem simulace v *SimufactForming* jsou nástroje a pracovní součásti. Je možné přidat mnoho nástrojů do procesu, ale pouze samotná součást může být aktivní. Objekty jsou přiděleny ke komponentům. Každý objekt obsahuje specifické informace, které definují komponent. Některé objekty jsou povinné, některé volitelné nebo situační. [6]



Obrázek 2.8 – Rozdíl mezi komponentem a objektem ve stromě procesů a katalogu objektů [6]

2.1.2 Předzpracování

Během předzpracování se nastavuje model, který prochází daným tvářecím procesem. Obsahuje všechny důležité informace, které jsou potřeba pro úspěšnou simulaci.

Pro základní model v procesu tváření jsou důležité kroky:

- vybrat vhodný aplikační modul a typ procesu,
- zvolit typ geometrie,
- vybrat požadovaný materiál,
- specifikovat třecí a teplotní vlastnosti,
- vytvořit síť modelu,
- nastavení a poté spuštění simulace. [6]

Automatické tvary

V *SimufactForming* je možné vytvořit jednoduché geometrické tvary (není potřeba CAD software). Mezi nejjednodušší tvary patří krychle, válec, dutý válec či krychle se zaoblenými hranami. [6]



Obrázek 2.9 – Vytvoření jednoduchých tvarů [6]

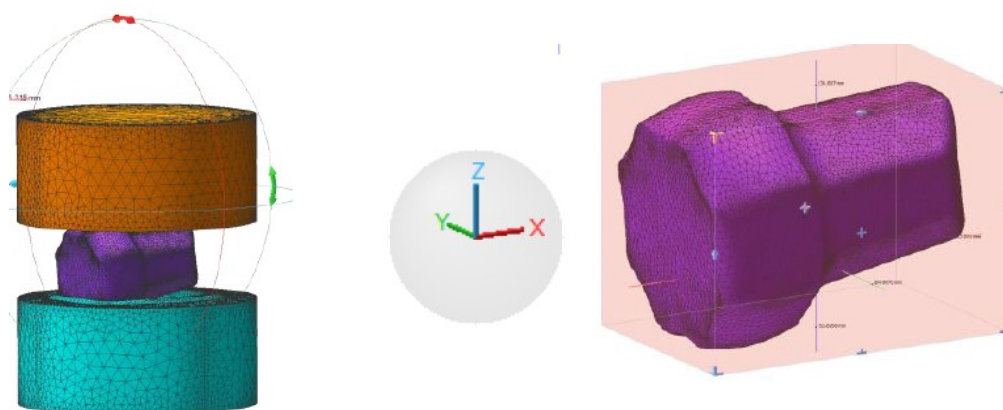
Pozice objektu (polohování)

Nastavení pozice objektu neboli modelu lze nastavit přímo v SimufactForming, původně lze nastavit v CAD softwaru.

Nabídka z určitých koncepcí:

- manuální polohování,
- polohování ve směru os (pohyb ve směru x [mm], rotace dle y [°]),
- polohování přes ohraničovací box objektu – každý model je obklopen tzv. ohraničovacím boxem,
- kontaktní polohování.

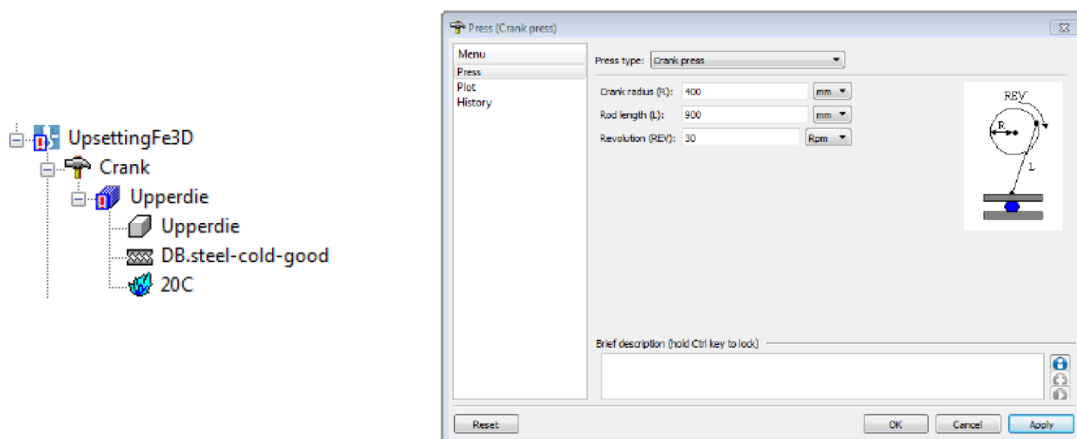
Software také nabízí automatické polohování objektu (přes možnost „pod-etapy“). [6]



Obrázek 2.10 – Polohování a ohraničovací box v *SimufactForming* [6]

Tvářecí stroj a pohyb nástroje

SimufactForming nabízí z nabídky tvářecích strojů, jako jsou například klikové, šroubové, hydraulické lis, aj. Tyto stroje pro tváření obsahují nastavení specifických parametrů (poloměr kliky, otáčky za minutu pro klikový lis, atd.). [6]



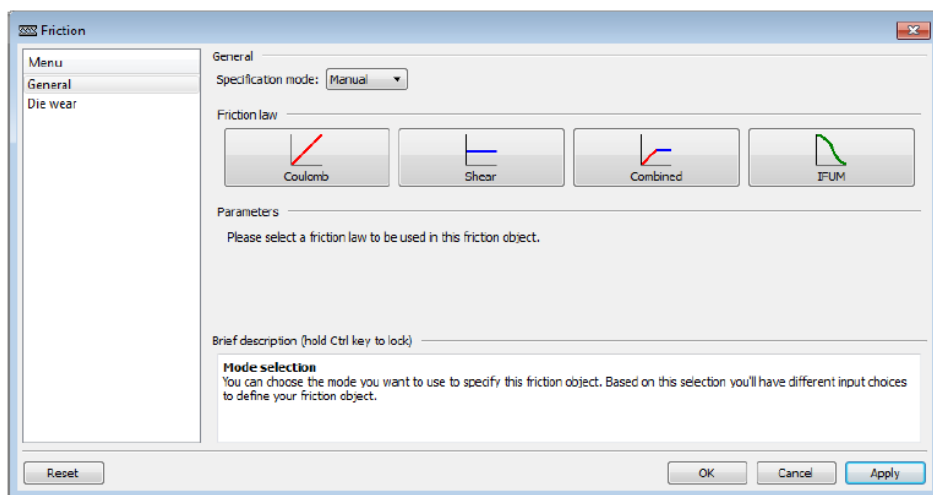
Obrázek 2.11 – Nastavení tvářecího stroje v *SimufactForming* [6]

Tření

Fyzikální procesy v *SimufactForming* jsou mezi komponenty popsány matematicky.

Jedním z těchto fyzikálních jevů, který je důležitým prvkem v *SimufactForming*, je tření:

- tření je důležitým faktorem v tvářecím procesu,
- tření má vliv na tok materiálu a zejména na tvářecí proces,
- lze vybrat druh tření z nabídky „třecích zákonů“,
- lze nastavit manuálně parametry tření. [6]

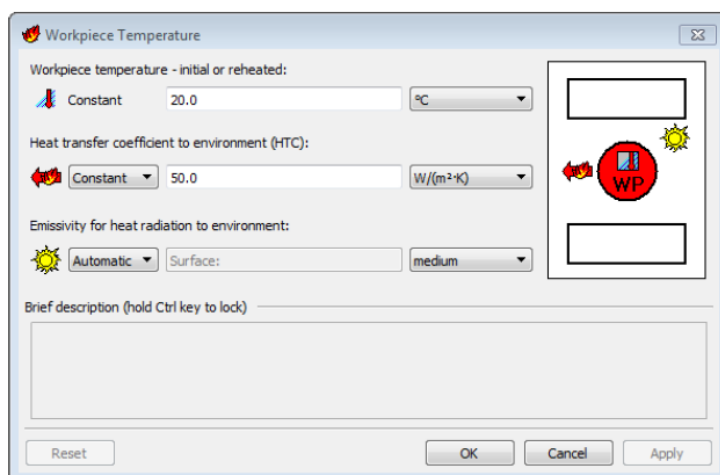


Obrázek 2.12 – Okno „Tření“ a jeho nastavení parametrů [6]

Teplotní vlastnosti modulu

Teplotní vlastnosti komponentu řídí rozložení a přechod tepla mezi modelem a okolím.

U každého komponentu je potřeba definovat teplotní vlastnosti, lze nastavit teplotní koeficienty, některé koeficienty *SimufactForming* vypočítává. [6]



Obrázek 2.13 – Okno „Teplotní vlastnosti modelu“ a jeho nastavení parametrů [6]

Kontrola tváření a modulu

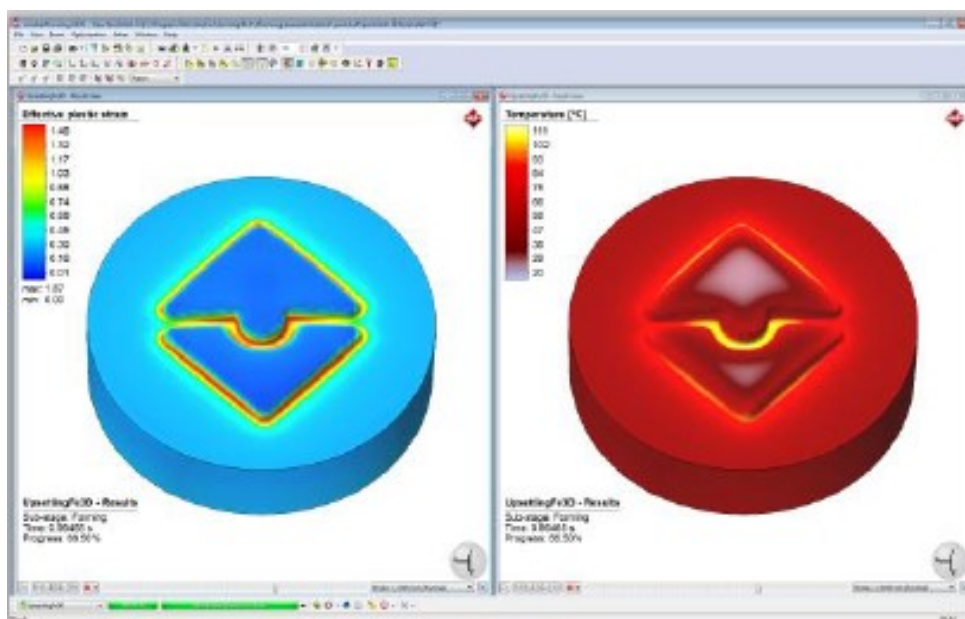
Všechna nastavení simulací jsou kombinovány pro všechny procesy v tzv. kontrole tváření. Zde se definují konečná kritéria simulace (čas, síla, atd.).

Před samotnou simulací, *SimufactForming* automaticky kontroluje model pro tvářecí proces, pokud je něco špatně, objeví se okno s varovací zprávou. [6]

2.1.3Zpracování

Vizualizace výsledků výpočtů

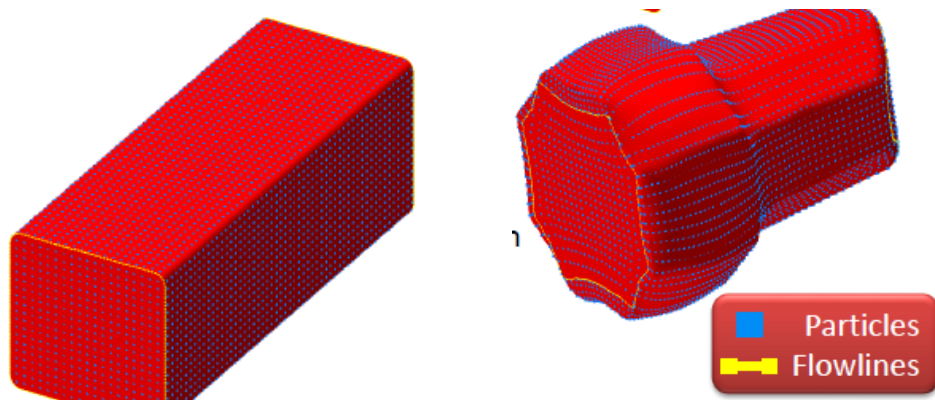
Ve stromě procesů se nachází ikona výsledky, po kliknutí se otevře okno s výslednou animací. Zde se nachází simulační výsledky (čas, zdvih,...) a náhled na animaci tvářecího procesu. Výsledný náhled má mnoho nastavení např. barva pozadí, pozice modelů, atd. [6]



Obrázek 2.14 – Výsledný náhled modulu s teplotními vlastnostmi [6]

Využití částic, tok materiálu

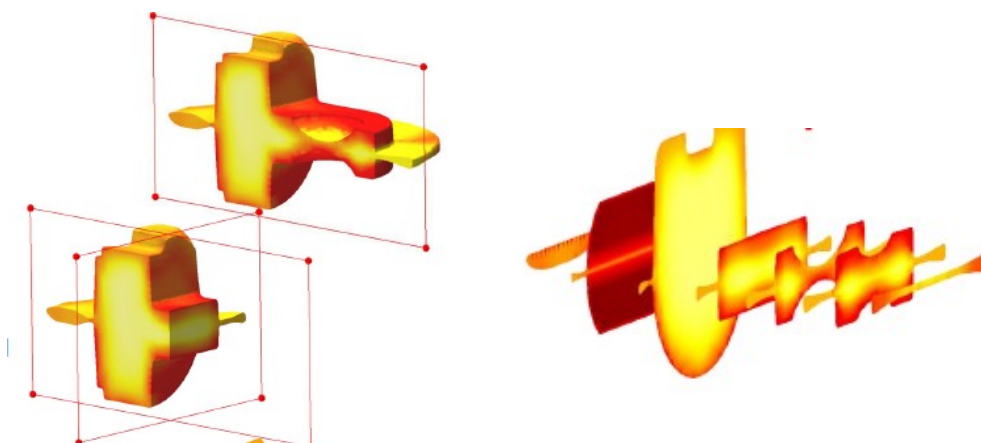
Částice v modelu jsou body, které následují tok materiálu a mohou být využity jako sledovací body. Tyto částice nepředstavují síť modelu. Částice a tok materiálu musí být definovány v předzpracování. [6]



Obrázek 2.15 – Zobrazení toku materiálu a částic (modré jsou částice, žlutý je tok materiálu) [6]

Náhled průřezem

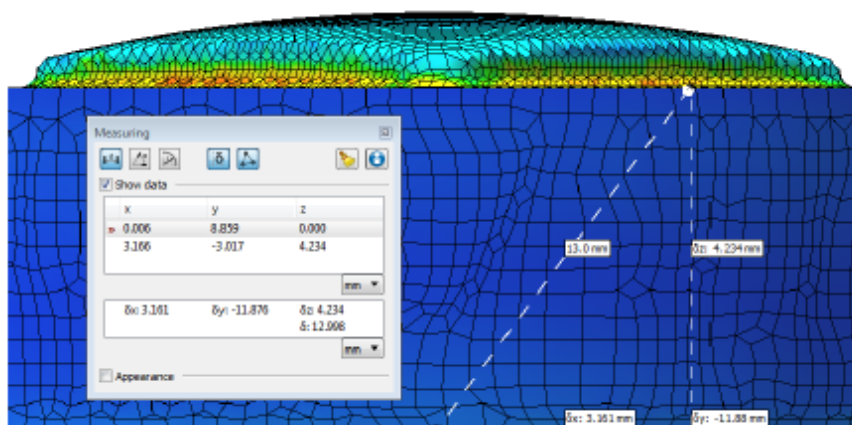
V *SimufactForming* se lze podívat na vnitřní pohled modelu (průřez) pomocí použití vytvoření rovin. Pozice pohledu může být změněna uchopením roviny do požadované pozice. [6]



Obrázek 2.16 – Průřez modelem, který byl vytvořený pomocí rovin [6]

Nástroj pro měření

Jedním z hlavních cílů simulace je předpovědět přesný tvar modelu pro tvářecí proces. Přesné měření rozměrů modelů provádí tzv. nástroj pro měření. Tento nástroj může měřit vzdálenosti, úhly a poloměry. Například může ukázat hodnoty podél hlavní osy nebo hlavního bodu v kruhu. Lze také samostatně vytvořit seznam výsledků po měření. [6]



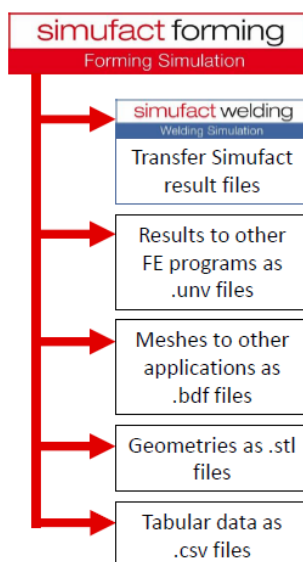
Obrázek 2.17 – Výpočet hodnot na modelu pomocí nástroje pro měření [6]

Převod (export) výsledných simulací v *SimufactForming*

Po samotné simulaci může být potřeba model převést do jiného softwaru jako například export ze *SimufactForming* do *SimufactWelding*, atd.

SimufactForming zapisuje výsledky vlastního formátu do vlastního souboru, tudíž lze přesunout výsledné soubory simulace do např. *SimufactWelding*, kde se může i nadále pracovat na modelu, který se vytvořil v *SimufactForming*.

Jako další příklady lze převést geometrii modelu jako .stl soubor, síť modelu jako .bdf soubor, atd. [6]

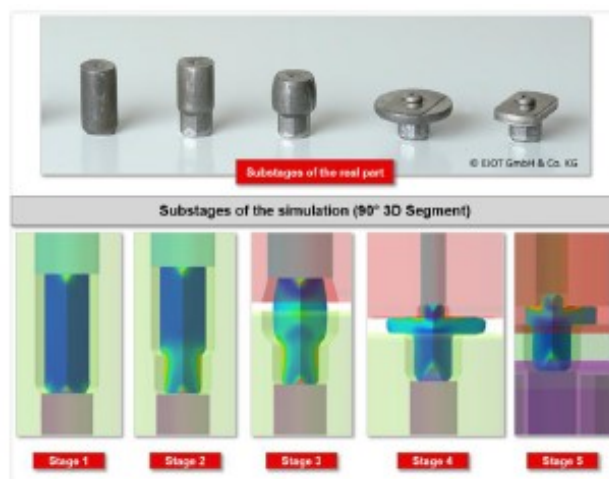


Obrázek 2.18 – Grafické znázornění, kde lze převést soubor z *SimufactForming* do příkladového *SimufactWelding* a zobrazení přípon souborů [6]

2.1.4 Pokročilá technika modelování

Vytváření modelů a jejich navazování

Většina tvářecích procesů vyžaduje více etap, aby se vymodeloval výsledný požadovaný tvar modelu. Aby tohoto *SimufactForming* dosáhl, vypisuje všechny výsledky z každého procesu a používá je pro další etapy procesního „řetězu“. [6]



Obrázek 2.19 – Etapy reálné a simulované součásti [6]

Identifikace parametru a geometrické variace

V *SimufactForming* lze optimalizovat vlastnosti, které umí automaticky vytvářet rozdílné varianty procesů.

Hlavní vlastnosti jsou:

- Identifikace parametru – simulované parametry jako například třecí koeficient jsou různé v průběhu celé simulace.
- Geometrické variace – *SimufactForming* může vyměnit geometrie v průběhu různých simulací a vyhodnotit výslednou kvalitu modelu. [6]

2.1.5 Kontrola a kalibrování simulace

Ověřování simulace

Když je nastavován simulační model, mnoho předpokladů je vytvořeno z hraničních hodnot modelu a vložených parametrů, které byly pro simulaci použity. Pro možnost vyhodnocení nejlépe simulovaných výsledků, by se měly zkontrolovat a přepsat parametry, tak aby simulace dosahovala reálných hodnot.

Nejlépe je začít od samotné simulace se součástí, která je v současné době produkována, a která je ve výrobním procesu bez výrazných problémů. Poté je možné přenastavit parametry, tak aby se podobaly parametrům reálné součásti. [6]



Obrázek 2.20 – Reálná součást a model v *SimufactForming* [12]

3 Protlačení slitiny AlMg3 metodou DRECE při analýze tvářecích procesů

3.1 Základní technologické parametry

- pás plechu o šířce 58 mm, tloušťce 2 mm a délce 1000 mm,
- protlačování pásu plechu probíhalo při rychlosti $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,
- tlaky přítlačných válců: 75 (před zónou deformace) / 150 (na vstupu do tvářecího zařízení)
- mazivo: silikonový olej,
- chemické složení slitiny AlMg3 (viz tabulka 3.1).

Označení		Složení [%]								
EN-AW	DIN	Křemík	Železo	Měď	Mangan	Hořčík	Chrom	Zinek	Titan	Mangan + uhlík
5754	AlMg3	≤ 0,40	≤ 0,40	≤ 0,10	≤ 0,50	2,6 - 3,6	≤ 0,3	≤ 0,20	≤ 0,15	0,10 - 0,60

Tabulka 3.1 – Chemické složení slitiny AlMg3 [7]

3.2 Postup protlačování

Pás plechu je vložen do zadní části tvářecího zařízení, jsou předem nastaveny optimalizované velikosti tlaků v hydraulických válcích.

Po zapnutí zařízení dochází k pohybu plechu do zóny deformace. Plech je pomocí dvou přítlačných hydraulických válců, v součinnosti s podávacím válcem, a mezikusů vtlačován do zóny deformace, jejíž geometrie je odvozena od tvaru horního a spodního tvářecího nástroje. V zóně deformace dochází k vytvoření napětového stavu umožňujícího dosažení podstatného zpevnění materiálu, částečného zjemnění zrna, ale především dochází k dislokačnímu zpevnění struktury.

Po vysunutí pásu plechu ze předního přítlačného válce dochází k podstatnému snížení třecí síly a následně k přerušení protlačovacího procesu. V první fázi musí být uvolněné přítlačné montážní šrouby čelní desky s tvářecím nástrojem, taktéž rovněž zjišťovací čepy. Tlaky v přítlačných hydraulických válcích jsou sníženy na 0 barů (0 Pa). Čelní deska s držákem, na kterém je upnut tvářecí nástroj, je pneumaticky odsunuta, pomocí čelisti a hydraulického válce je koncová část plechu vysunuta z tvářecího nástroje, aniž dojde k přerušení napětového stavu vytvořeného v zóně deformace. Při analýze vlivu počtu průchodů na mechanické vlastnosti a strukturu, byly provedeny obdobným způsobem další průchody tvářecím zařízením.

3.3 Protlačování slitiny AlMg3

3.3.1 Vliv počtu průchodů plechu tvářecím zařízením na mechanické vlastnosti

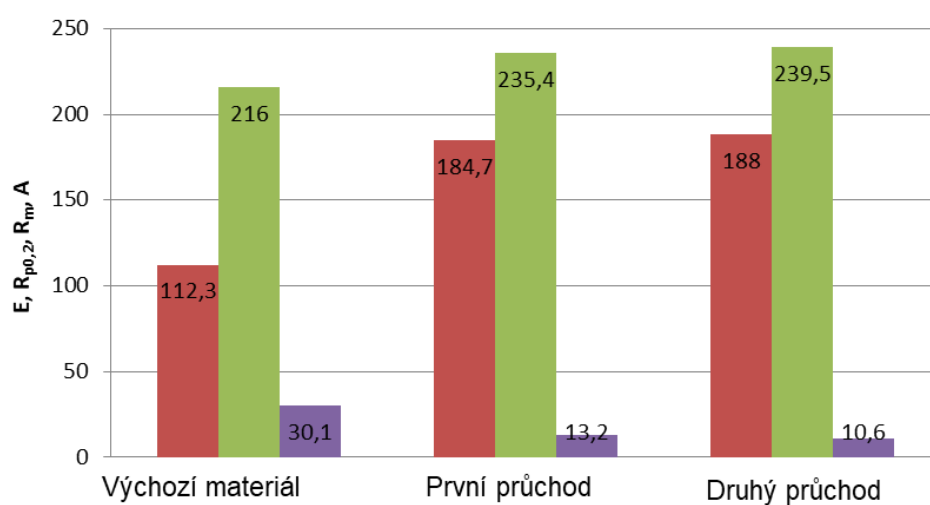
Po protlačení pásu plechu slitiny AlMg3 jsem provedla vyhodnocení vlivu počtu průchodů na mechanické vlastnosti. Stav průchodů jsou zaznamenány pouze tři (výchozí materiál, první průchod a druhý průchod), protože v dalších průchodech dochází pouze k nepatrnému zvyšování tvrdosti a mechanických vlastností slitiny AlMg3.

Počet průchodů plechu tvářecím zařízením	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
Výchozí materiál (1)	120	210	29,5
Výchozí materiál (2)	97	217	32
Výchozí materiál (3)	120	221	28,8
První průchod (4)	199	235	15
První průchod (5)	191	238	15,5
První průchod (6)	134	235	13,8
První průchod (7)	174	232	13,6
První průchod (8)	194	234	13,2
První průchod (9)	192	235	15
První průchod (10)	209	239	6,3
Druhý průchod (11)	211	239	10,1
Druhý průchod (12)	165	240	11,1

Tabulka 3.2 – Vliv počtu průchodů na mechanické vlastnosti slitiny AlMg3

Počet průchodů plechu tvářecím zařízením	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
Výchozí materiál	112,3	216	30,1
První průchod	184,7	235,4	13,2
Druhý průchod	188	239,5	10,6

Tabulka 3.3 – Vliv počtu průchodů tvářecím zařízením na vlastnosti materiálu (střední hodnoty)



Obrázek 3.1 – Vliv počtu průchodů tvářecím zařízením na vlastnosti materiálu (střední hodnoty)

Shrnutí výsledků:

Z dosažených výsledků je možné konstatovat, že dochází ke zvyšování mechanických vlastností (meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m) v závislosti na počtech průchodů (viz obrázek 3.1). Hodnota tažnosti A s vyšším počtem průchodu se snižuje, dle teoretických předpokladů. Po prvním průchodu je její velikost dostačující pro následné tváření polotovaru do finální podoby, což je velmi důležitý poznatek pro aplikaci dané tvářecí metody v praxi.

3.3.2 Vliv počtu průchodů na velikost tvrdosti HV10 u slitiny AlMg3

Průchody plechu tvářecím zařízením	Tvrdosti HV10:		
	1. měření	2. měření	3. měření
První průchod	80,2	81,2	79,8
Druhý průchod	90	86,9	87,3
Třetí průchod	94,9	92,4	92
Čtvrtý průchod	91,2	92	93,2
Pátý průchod	88	84,3	91,2
Šestý průchod	92,4	89,6	92

Tabulka 3.4 – Vliv počtu průchodů tvářecím
zařízením na hodnotu tvrdosti.

Průchody plechu tvářecím zařízením	Tvrdosti HV10:	
	Průměrná hodnota tvrdosti ze 3 měření	
První průchod	80,4	
Druhý průchod	88,06	
Třetí průchod	93,1	
Čtvrtý průchod	92,13	
Pátý průchod	87,83	
Šestý průchod	91,3	

Tabulka 3.5 – Vliv počtu průchodů tvářecím
zařízením na průměrnou hodnotu tvrdosti.

Z dosažených výsledků je patrné, že změny velikosti tvrdosti jsou významné pouze do třetího průchodu tvářecím zařízením (nárůst hodnot tvrdosti). Další průchody tvářecím zařízením nevedou k významným změnám v hodnotách tvrdosti.

3.3.3 Analýza vlivu velikosti tlaků přitlačných válců na velikost tvrdosti HV10

Průchody plechu tvářecím zařízením	Tvrdosti HV10:			PŘÍTLAKY [bar]
	1. měření	2. měření	3. měření	
Výchozí stav	68,1	69,1	68,6	-
6x (1)	79,8	77,6	78,2	50/150
První průchod (2)	94,1	88,4	90	50/150
První průchod (3)	87,3	86,5	92	25/100
První průchod (4)	88,4	88,4	90,4	25/125
První průchod (5)	91,2	90,4	90,4	50/125
První průchod (6)	90,4	90	93,2	75/125
První průchod (7)	93,6	92	94,1	75/150

Tabulka 3.6 – Vliv různých tlaků [bar] ve válci na výchozí stav a stav po prvním průchodu

Průchody plechu tvářecím zařízením	Tvrdosti HV10:		
	1. měření	2. měření	3. měření
Výchozí stav	68,1	69,1	68,6
Střední hodnota prvního průchodu	90,83	89,28	91,68

Tabulka 3.7 – Vliv různých tlaků [bar] ve válci na výchozí stav a na průměrný stav po prvním průchodu

Vyhodnocení:

Při srovnání hodnot tvrdosti HV10 výchozím stavu a stavu po prvním průchodu, dochází k jejímu nárůstu u všech ověřovaných velikostí nastavení tlaků (viz tabulka 4.6). Optimální se jeví hodnoty přitlaku 75 a 150 bar.

3.3.4 Vliv tepelného zpracování na velikost tvrdosti po 6. průchodu tvářecím zařízením

AlMg3, po šesti průchodech, přítlak 75/150, tepelné zpracování 350 °C	
Časová výdrž:	Tvrdost HV10:
Výdrž 30 minut	61
Výdrž 60 minut	59

Tabulka 3.8 – Velikost tvrdosti HV10 po 6. průchodu po tepelném zpracování

Vyhodnocení:

Tabulka 3.8 poukazuje na to, o kolik došlo ke snížení hodnoty tvrdosti z hlediska tažnosti, což není podle teoretických předpokladů.

3.3.5 Analýza průchodu při maximální rychlosti

Experimentální výsledky při maximální rychlosti $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$:

AlMg3, po prvním průchodu, přítlak 75/150 při maximální rychlosti protlačení	
HV10	87

Tabulka 3.9 – Analýza po prvním průchodu při maximální rychlosti

Srovnání vlivu rychlostí na tvrdost HV10:

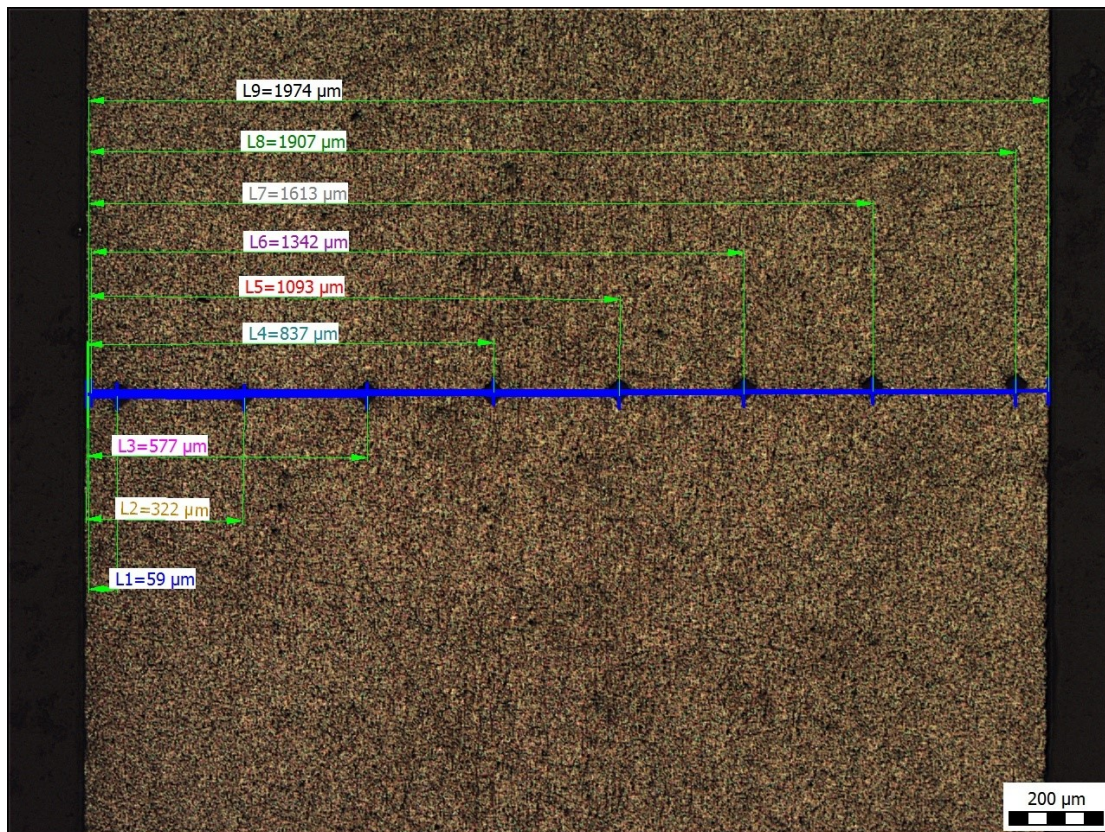
Slitina AlMg3, měření po 1. průchodu	
Rychlost protlačení:	Tvrdost HV10:
$5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	90,6
$10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	87

Tabulka 3.10 – Srovnání výsledku hodnot tvrdosti při různých rychlostech protlačení plechu tvářecím zařízením

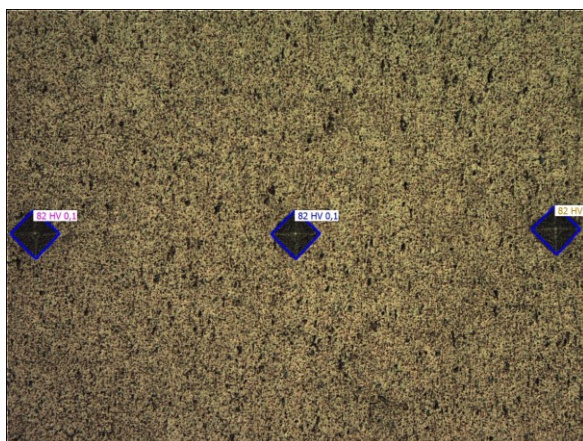
Při porovnání rychlostí a tvrdostí při rychlosti $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ byla zaznamenána střední hodnota tvrdosti HV10 90,6 a při maximální rychlosti $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ byla střední hodnota tvrdosti HV10 ze tří měření nižší než dříve, a to 87.

4 Analýza vlivu počtu průchodů tvářecím zařízením na mikrotvrdost u výchozího stavu materiálu a po 1. průchodu tvářecím zařízením.

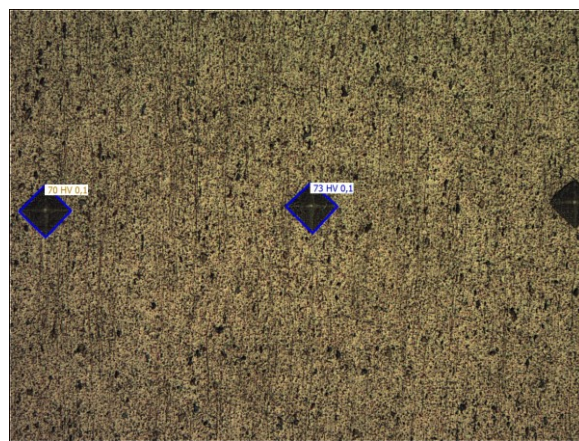
Na obrázku 4.1 až obrázku 4.5 jsou uvedena místa měření mikrotvrdosti (HV0,1) u výchozího stavu slitiny AlMg3.



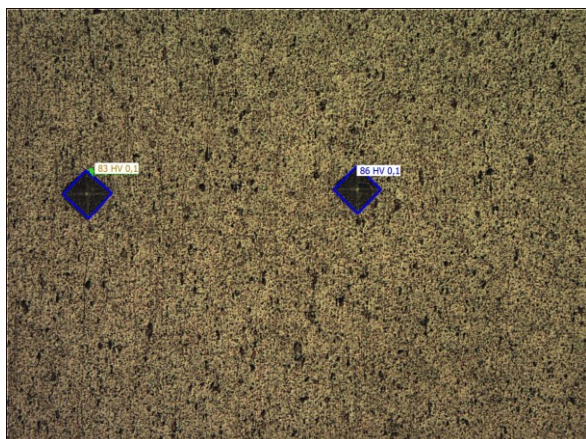
Obrázek 4.1 – Vzdálenost měření od povrchu
[μm]



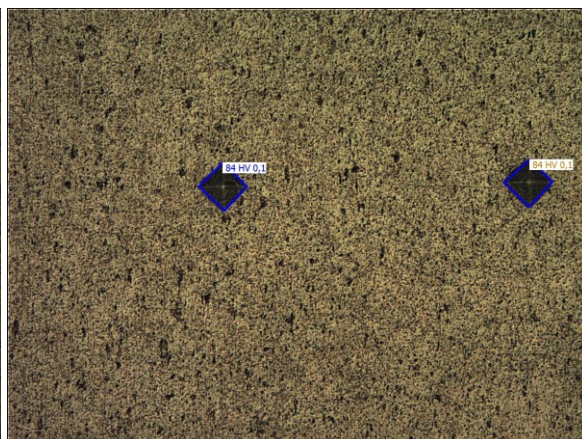
Obrázek 4.2 – Experimentální výsledky mikrotvrdostí (1 – 3) na vzdálenost od povrchu (1 – 3) – viz tabulka 4.1



Obrázek 4.3 – Experimentální výsledky mikrotvrdostí (4 – 5) na vzdálenost od povrchu (4 – 5) – viz tabulka 4.1

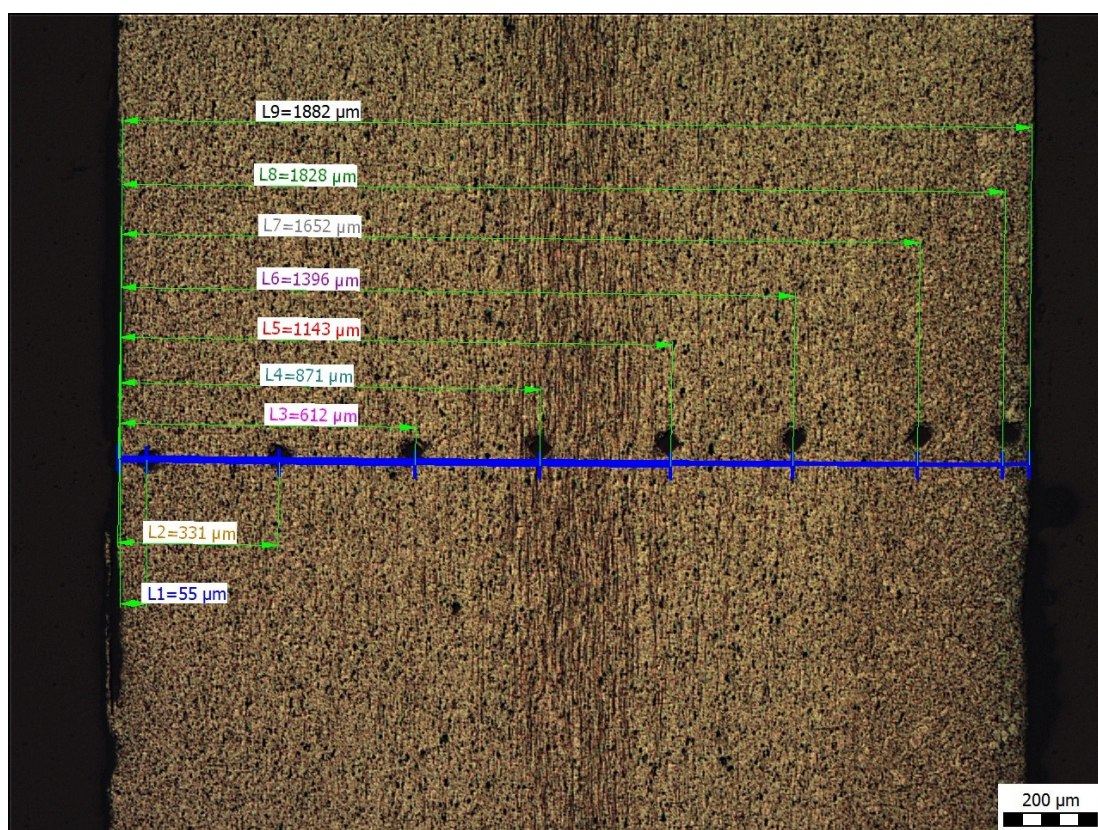


Obrázek 4.4 – Experimentální výsledky mikrotvrdostí (6 – 7) na vzdálenost od povrchu (6 – 7) – viz tabulka 4.1

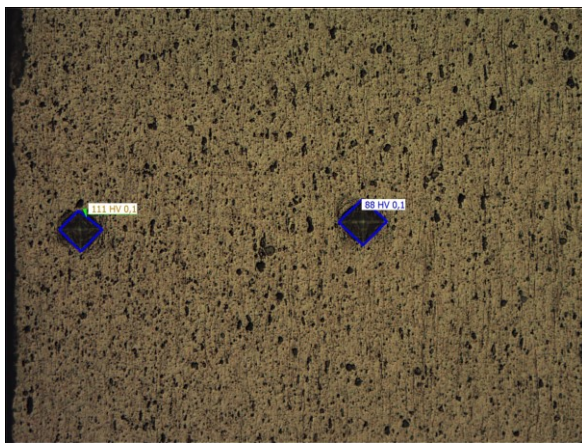


Obrázek 4.5 – Experimentální výsledky mikrotvrdostí (8 – 9) na vzdálenost od povrchu (8 – 9) – viz tabulka 4.1

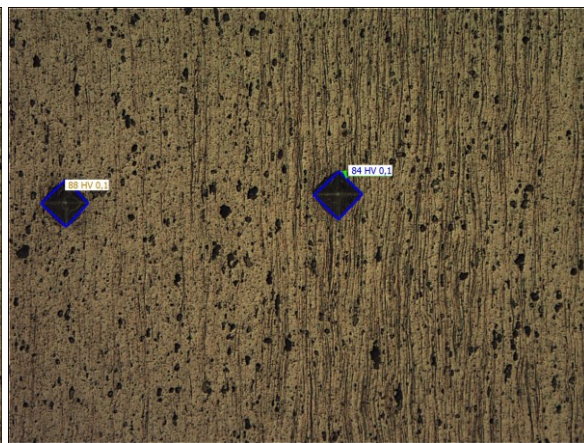
V obrázku 4.6 až obrázku 4.10 je uvedeno měření mikrotvrdosti (HV0,1) u slitiny AlMg3 po 1. průchodu tvářecím zařízením, po šířce pásu plechu metodou DRECE.



Obrázek 4.6 – Vzdálenost měření od povrchu [μm]



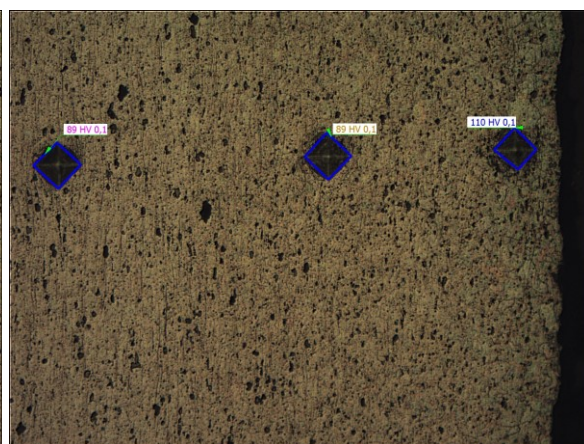
Obrázek 4.7 – Experimentální výsledky mikrotvrdostí (1 – 2) na vzdálenost od povrchu (1 – 2) – viz tabulka 4.2



Obrázek 4.8 – Experimentální výsledky mikrotvrdostí (3 – 4) na vzdálenost od povrchu (3 – 4) – viz tabulka 4.2



Obrázek 4.9 – Experimentální výsledky mikrotvrdostí (5 – 6) na vzdálenost od povrchu (5 – 6) – viz tabulka 4.2



Obrázek 4.10 – Experimentální výsledky mikrotvrdostí (7 – 9) na vzdálenost od povrchu (7 – 9) – viz tabulka 4.2

Výchozí stav slitiny AlMg3	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrdost HV0,1
(1)	59	82
(2)	322	82
(3)	577	82
(4)	837	70
(5)	1093	73
(6)	1342	83
(7)	1613	86
(8)	1907	84
(9)	1974	84

Tabulka 4.1 – Výsledné hodnoty mikrotvrdosti HV0,1 při výchozím stavu slitiny AlMg3

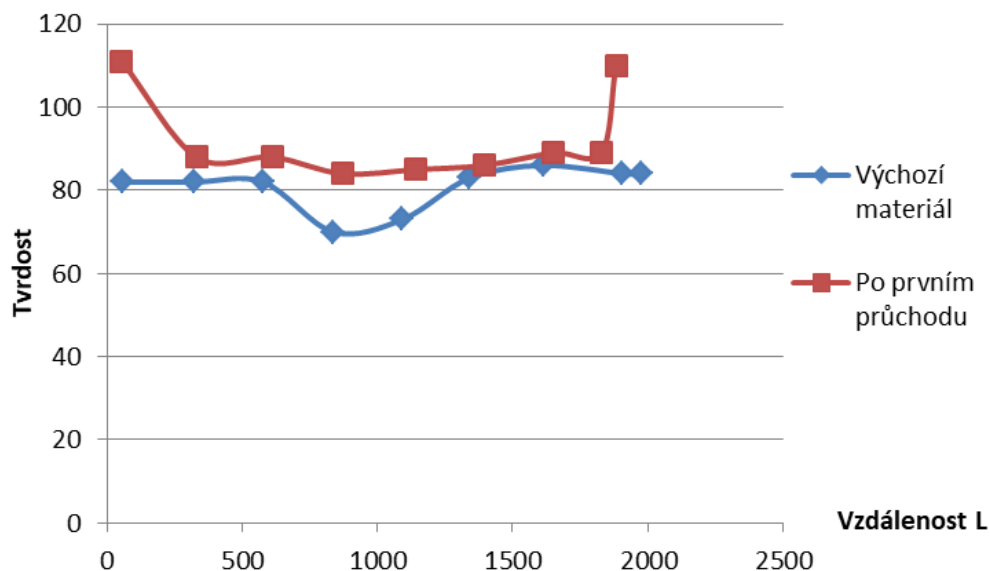
Slitina AlMg3 po 1. průchodu	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrst HV0,1
(1)	55	111
(2)	331	88
(3)	612	88
(4)	871	84
(5)	1143	85
(6)	1396	86
(7)	1652	89
(8)	1828	89
(9)	1882	110

Tabulka 4.2 – Výsledné hodnoty
mikrotvrdosti HV0,1 po 1. průchodu slitiny
AlMg3

Při porovnání tvrdosti u výchozího stavu a po prvním průchodu vyšly výsledky:

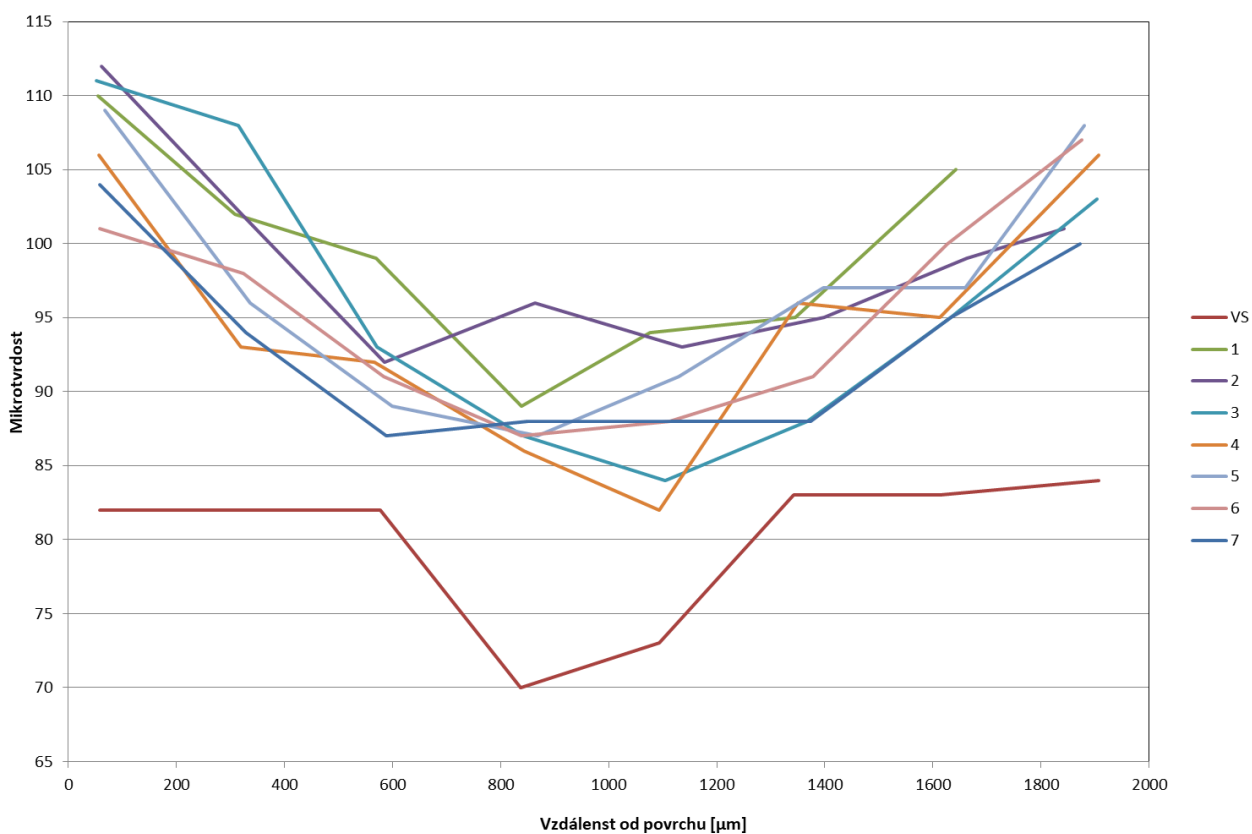
	Výchozí materiál / stav	Po prvním průchodu
Vzdálenost L1 [μm]	59	55
Vzdálenost L2 [μm]	322	331
Vzdálenost L3 [μm]	577	612
Vzdálenost L4 [μm]	837	871
Vzdálenost L5 [μm]	1093	1143
Vzdálenost L6 [μm]	1342	1396
Vzdálenost L7 [μm]	1613	1652
Vzdálenost L8 [μm]	1907	1828
Vzdálenost L9 [μm]	1974	1882
Mikrotvrst HV0,1 (1)	82	111
Mikrotvrst HV0,1 (2)	82	88
Mikrotvrst HV0,1 (3)	82	88
Mikrotvrst HV0,1 (4)	70	84
Mikrotvrst HV0,1 (5)	73	85
Mikrotvrst HV0,1 (6)	83	86
Mikrotvrst HV0,1 (7)	86	89
Mikrotvrst HV0,1 (8)	84	89
Mikrotvrst HV0,1 (9)	84	110

Tabulka 4.3 – Tabulka výsledků pro porovnání vzdáleností a tvrdostí
s výchozím materiálem a materiálem po prvním průchodu



Obrázek 4.11 – Graf pro porovnání vzdáleností a tvrdostí s výchozím materiálem a materiálem po prvním průchodu

Při dalším experimentálním měření tvrdosti na vzdálenost, pro výchozí stav a sedm průchodů, vyšel výsledný graf při optimálním nastavení tlaků v přitlačných válcích (75 a 150 bar) i rychlosti pásu ($10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$):



Obrázek 4.12 – Graf pro porovnání vzdáleností od povrchu a mikrotvrdostí pro výchozí stav a dalších sedm průchodů

L	Mikrotvrđost	L	Mikrotvrđost	L	Mikrotvrđost	L	Mikrotvrđost	L	Mikrotvrđost	L	Mikrotvrđost	L	Mikrotvrđost	L	Mikrotvrđost
59	82	55	110	62	112	52	111	57	106	68	109	59	101	59	104
322	82	308	102	321	102	315	108	319	93	337	96	324	98	329	94
577	82	570	99	586	92	571	93	567	92	600	89	584	91	588	87
837	70	839	89	863	96	842	87	844	86	869	87	839	87	849	88
1093	73	1077	94	1136	93	1104	84	1094	82	1130	91	1113	88	1116	88
1342	83	1346	95	1398	95	1367	88	1350	96	1397	97	1378	91	1373	88
1613	83	1643	105	1663	99	1633	95	1613	95	1660	97	1627	100	1633	95
1907	84	1722		1843	101	1903	103	1907	106	1880	108	1876	107	1873	100
1974				1912		1967		1975		1942		1942		1937	
Výchozí stav		1. průchod		2. průchod		3. průchod		4. průchod		5. průchod		6. průchod		7. průchod	

Tabulka 4.4 – Tabulka výsledků pro porovnání vzdáleností od povrchu a mikrotvrđosti pro výchozí stav a dalších sedm průchodů

Shrnutí dosažených poznatků:

Dle tabulky 4.3 a obrázku 4.11, který zobrazuje graf mikrotvrđosti HV_{0,1} v závislosti na vzdálenosti od povrchu L, při výchozím stavu a stavu po 1. průchodu materiálu slitiny AlMg₃, má největší rozdíl mikrotvrđosti v bodech 1 (mikrotvrđost 1, L1), 4 (tvrđost 4, L4) a 9 (tvrđost 9, L9).

Při měření mikrotvrđosti HV_{0,1} (po 1. průchodu) ve vzdálenosti 871 μm dochází ke snížení tvrđosti HV_{0,1} o hodnotu 27 (HV_{0,1} (4) je 84) vzhledem k okraji pásu plechu, kde hodnota je vyšší o hodnotu 26 (HV_{0,1} (9) je 110). Dle obrázku 4.12 je prvotní snížení, a poté navýšení tvrđosti na okraji plechu, s rostoucí vzdáleností u výchozího stavu a všech sedmi průchodů podobný.

Dle tabulky 4.4 a obrázku 4.12 bylo dosaženo nejvyšší mikrotvrđosti HV₁₀ po 2. průchodu, nejnižší mikrotvrđost byla při výchozím stavu.

K menšímu poklesu hodnot mikrotvrđostí HV_{0,1} a tvrđostí HV₁₀ dochází v důsledku nerovnoměrné plastické deformace.

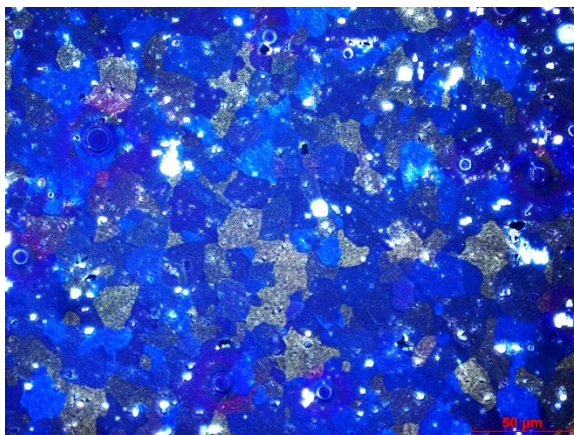
5 Metalografická analýza

Mikrostrukturální pozorování vzorků v počátečním stavu a po procesu metodou DRECE bylo provedeno pomocí světelného optického mikroskopu Zeiss Axio Observer Z1. Tyto zkoumané vzorky velikosti zrn byly zafixovány pomocí Barkerovy tekutiny, která se skládá z vody, formolu (vodný roztok formaldehydu) a chloridu vápenatého.

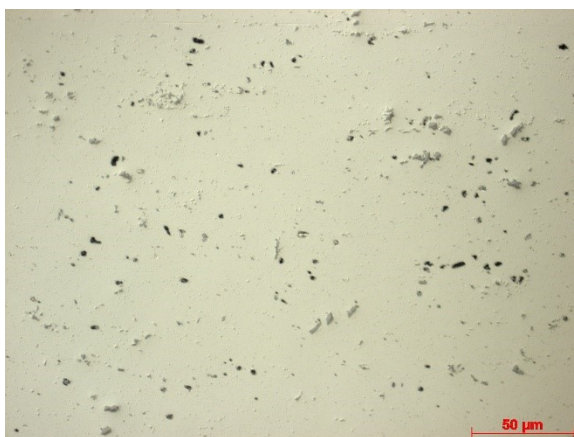


Obrázek 5.1 – Světelný optický mikroskop Zeiss Axio Observer Z1 [11]

Pro podrobnější studium vývoje mikrostruktury byly vzorky slitin AlMg3 elektrolyticky odděleny v elektrolytu, který obsahoval 20% kyseliny dusičné a 80% methanolu při teplotě - 30°C a 20 V, po dobu 15 vteřin. Struktura zrn byla zaznamenána mikroskopií s orientačním zobrazením (OIM) za použití techniky elektronově zpětně rozptýlené difrakce (EBSD) integrované se Zeiss Supra 65 skenovacím elektronovým mikroskopem. Plocha 100 x 100 μm byla skenována na rovině normálního směru a velikost kroku byla vzata na 0,1 μm ve všech skenech. Úhel tolerance zrna byl 5°, aby se dosáhlo distribuce velikosti zrna a vyhodnotila se průměrná velikost zrna.

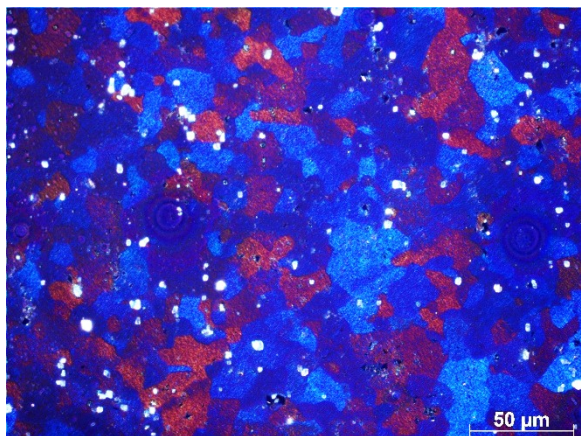


Obrázek 5.2 – Mikrostruktura slitiny AlMg3
v počátečním stavu – světlá pole [8]

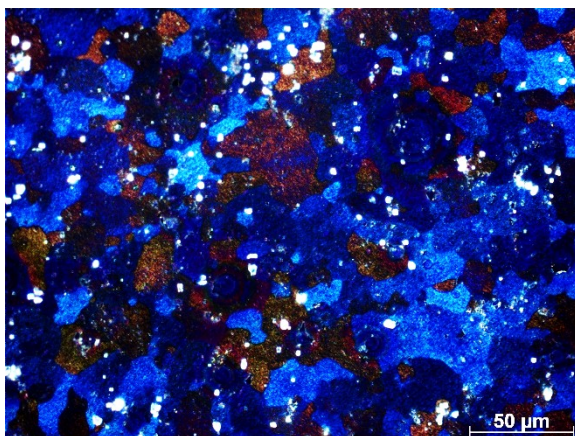


Obrázek 5.3 – Mikrostruktura slitiny AlMg3
v počátečním stavu – polarizované světlo [8]

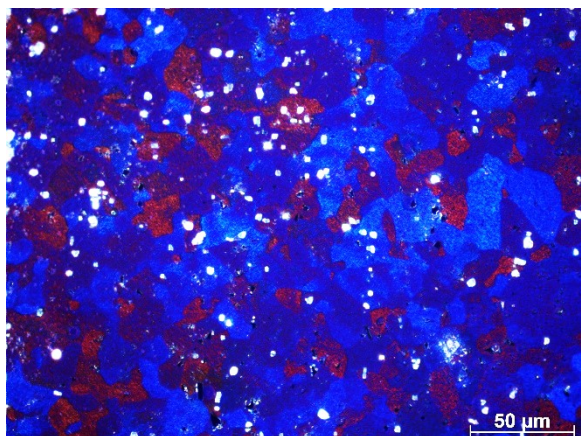
Obrázek 5.2 je mikrostruktura zkoumané slitiny AlMg3 v počátečním stavu, vykazující rovnoměrné zrnno. Matrice se skládá z hořčíku v hliníku pevného roztoku s jemně rozloženými dispergátory fází Mg_2Si a Al_6Mn , viz obrázek 5.3. Tyto sraženiny se nacházejí převážně na hranicích zrn a v zrnech.



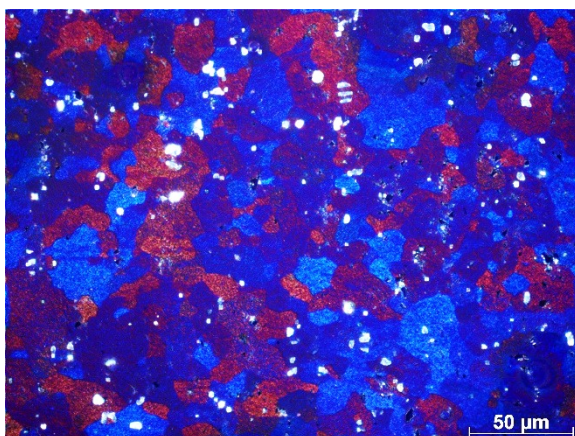
Obrázek 5.4 – Příklady struktur zrn ve slitině AlMg3 – první průřhod [8]



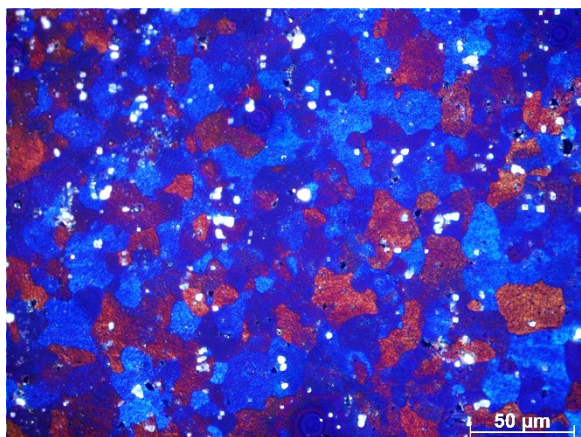
Obrázek 5.5 – Příklady struktur zrn ve slitině AlMg3 – druhý průřhod [8]



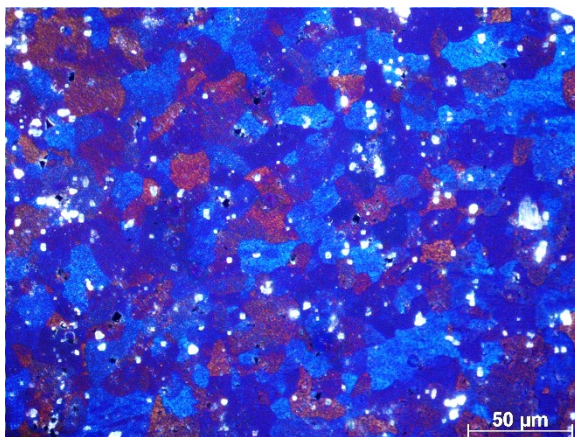
Obrázek 5.6 – Příklady struktur zrn ve slitině AlMg3 – třetí průřhod [8]



Obrázek 5.7 – Příklady struktur zrn ve slitině AlMg3 – čtvrtý průřhod [8]



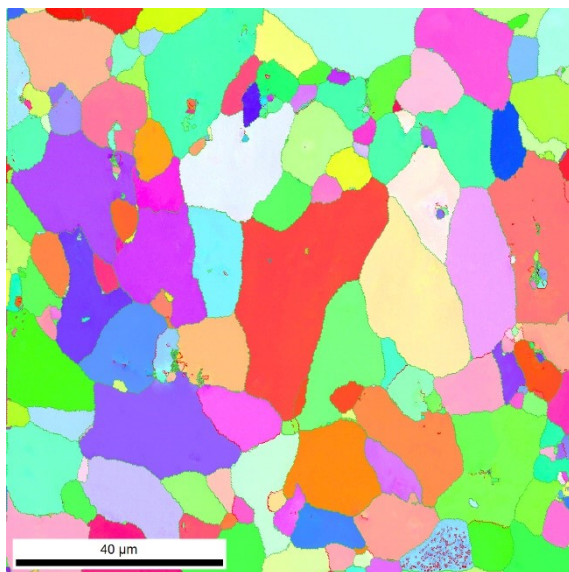
Obrázek 5.8 – Příklady struktur zrn ve slitině AlMg3 – pátý průřhod [8]



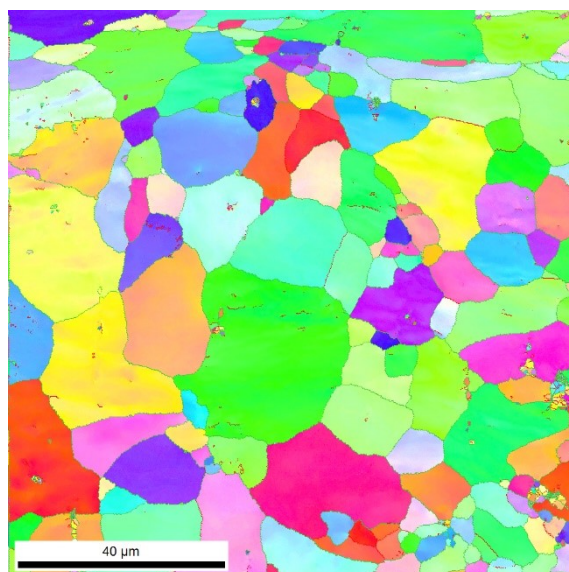
Obrázek 5.9 – Příklady struktur zrn ve slitině AlMg3 – šestý průřhod [8]

Obrázek 5.4 až obrázek 5.9 je zobrazena analýza na optickém mikroskopu slitiny AlMg3 výchozího stavu a po procesu SPD až do 6. průchodu. Ve srovnání s počáteční stavovou mikrostrukturou nedochází k podstatnému snížení velikosti zrna.

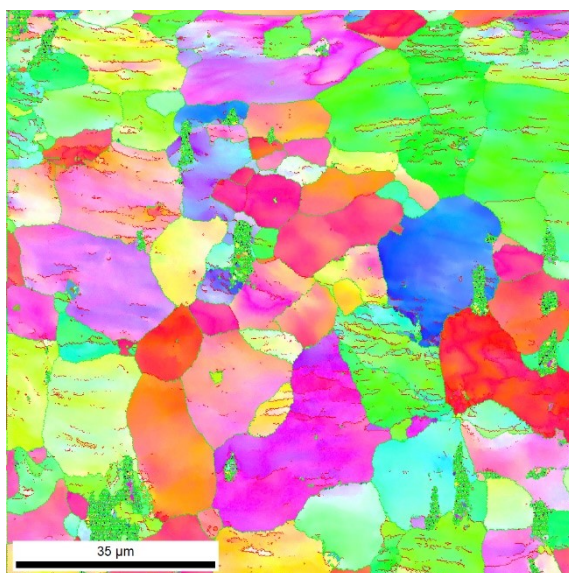
Některé oblasti různých krystalografických orientací však lze pozorovat v zrnech. S rostoucím počtem průchodů DRECE jsou změny v mikrostruktuře málo pozorovatelné. Během deformace zůstávají zrna přibližně stejnoměrná a téměř konstantní.



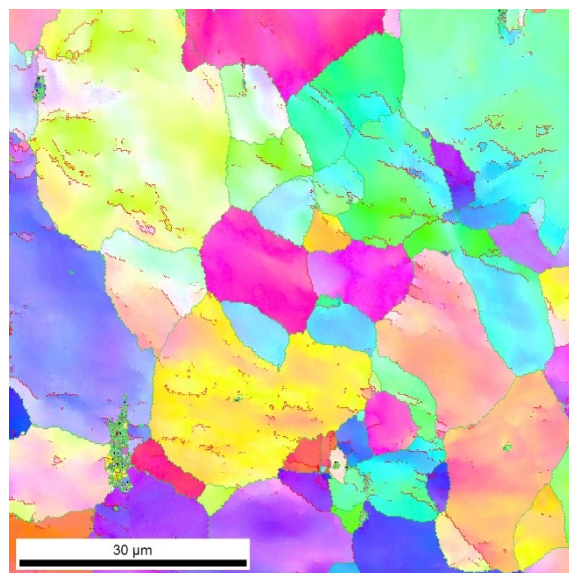
Obrázek 5.10 – Mapy EBSD slitiny AlMg3 v počátečním stavu [8]



Obrázek 5.11 – Mapy EBSD slitiny AlMg3 po prvním průchodu [8]



Obrázek 5.12 – Mapy EBSD slitiny AlMg3 po čtvrtém průchodu [8]



Obrázek 5.13 – Mapy EBSD slitiny AlMg3 po šestém průchodu [8]

Obrázek 5.10 až obrázek 5.13 ukazuje inverzní pólové mapy slitiny AlMg3 v počátečním stavu a po šesti průchodech tvářecím zařízením při metodě DRECE.

Tyto obrazy jsou prezentovány pomocí barev zrna, které odpovídají orientaci zrna, jak je označeno v pólovém zobrazení. Zelené čáry označují umístění hranic s vysokým úhlem zrna ($\Theta > 15^\circ$), zatímco červené čáry označují umístění hranic s nízkým úhlem zrna ($3^\circ > \Theta > 15^\circ$).

Na obrázku 5.10 je znázorněna mikrostruktura počátečního stavového vzorku, kde jsou viditelná zkosená zrna bez subzrn a nadbytečných dislokací. Naměřená průměrná délka záhytu vzorku před deformací je $\sim 3,05 \mu\text{m}$.

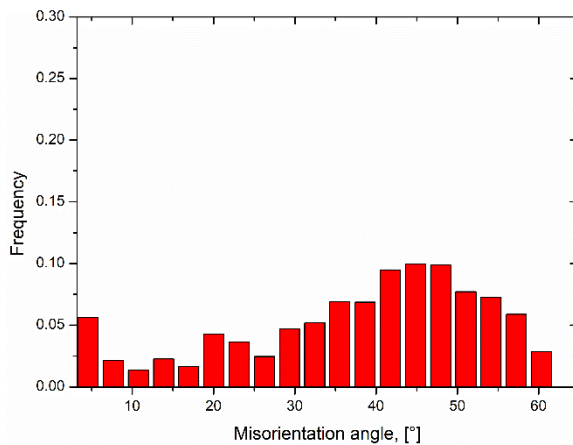
Na obrázku 5.11 je zobrazena mikrostruktura po prvním průchodu DRECE. Zde je jasně ukázán nárůst HV10 obklopených nízko-úhlovými hranicemi zrna a malými odchylkami v orientaci krystalů v původních zrnech. Průměrná velikost zrna po prvním průchodu DRECE zůstává téměř beze změny $\sim 3,07 \mu\text{m}$.

Na obrázku 5.12 je ukázán vliv čtyř průchodů DRECE na mikrostrukturu slitiny AlMg3, kde jsou zrnité vnitřky pokryté mnoha subzrny s nízkou velikostí úhlů hranic zrn.

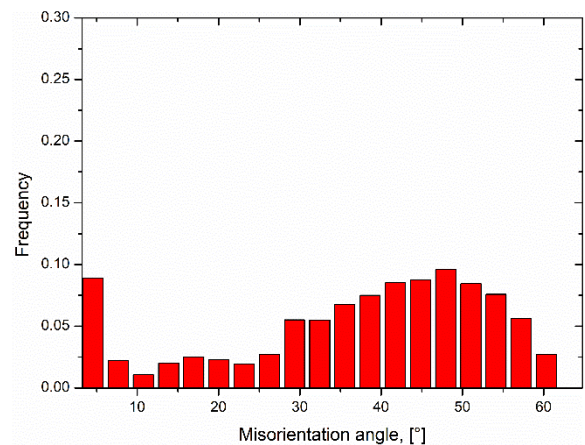
Na obrázku 5.13 je ukázána mikrostruktura vzorku, který byl podroben šesti průchodům tvářecím zařízením metodou DRECE.

Z analýzy na SEM s využitím metody EBSD přibližně 69% zrn má úhly hranic zrn větší než 15° , což dokazuje ve struktuře převahu HAG (zrna s vysokým úhlem hranic zrn) vzhledem ke zbývajcímu podílu 21% LAG (zrna s nízkým úhlem hranic). Po následujících průchodech tvářecím zařízením je dán dobrý předpoklad zjemnění struktury (tvorba subzrn). Pozorované subzrna (deformační pásy) jsou vyrovnány téměř kolmo ke směru protlačování.

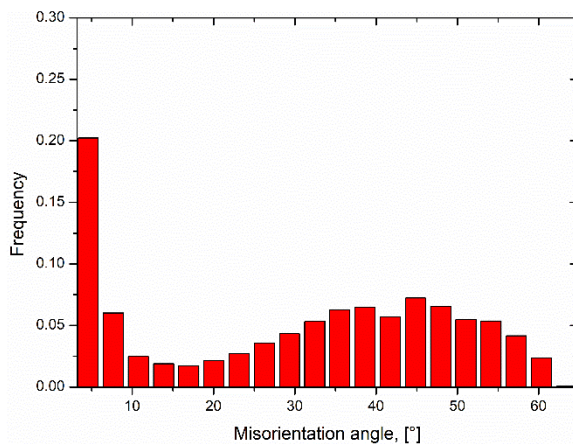
Velmi důležitým poznatkem je nárůst úhlových hranic zrn vzrostl z $\sim 11,3 \%$ ve výchozím stavu na $37,6 \%$ po šestém průchodu, což vede ke snížení velikosti úhlu chybné odchylky (θ_{AV}) z $37,74^\circ$ na $28,63^\circ$ (střední hodnota). Podíl nízko-úhlových hranic zrn odpovídá počátečním stádiím tvorby dislokační struktury (viz obrázek 5.14 až obrázek 5.17).



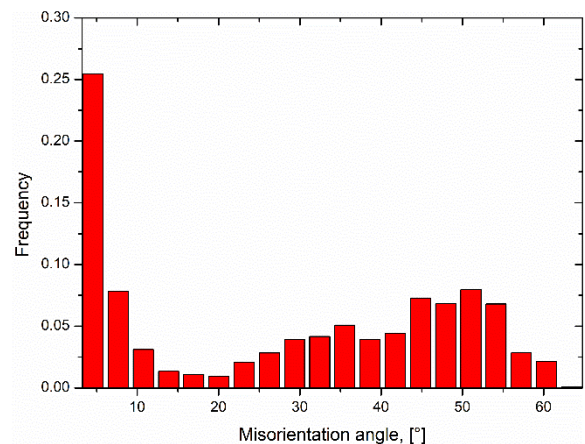
Obrázek 5.14 – Rozložení vzorku slitiny AlMg3 při výchozím stavu [8]



Obrázek 5.15 – Rozložení vzorku slitiny AlMg3 po prvním průchodu [8]



Obrázek 5.16 – Rozložení vzorku slitiny AlMg3 po čtvrtém průchodu [8]



Obrázek 5.17 – Rozložení vzorku slitiny AlMg3 po šestém průchodu [8]

	Velikost zrna [μm]	Podíl nízko-úhlových hranic zrn [%]	Podíl vysoko-úhlových hranic zrn [%]	Průměrný úhel odchylky, θ_{AV} [°]
Počáteční stav	3,05	11,3	88,7	37,74
První průchod	3,07	14,1	85,9	36,98
Čtvrtý průchod	1,92	30,5	69,5	30,10
Šestý průchod	2,88	37,6	62,4	28,63

Tabulka 5.1 – Souhrnné výsledky analýzy EBSD [8]

Z tabulky 5.1 vyplývá, že se velikost zrna po prvním průchodu výrazně nezmění. Velikost zrna ve výchozím stavu se po 1. průchodu tvářecím zařízením výrazně nemění (z hodnoty $3,05\ \mu m$ a $3,07\ \mu m$). Po čtvrtém průchodu se ale podstatně zmenší na hodnotu $1,92\ \mu m$. V dalších průchodech se vrací střední velikost zrna k původní velikosti. Příčinou může být zotavení struktury.

Podíl nízko-úhlových hranic zrn je zachován do prvního průchodu, vyšší hodnoty podílu nízko-úhlových hranic zrn jsou dosaženy po čtvrtém a šestém průchodu.

6 Závěr, vyhodnocení dosažených výsledků

V bakalářské práci jsem řešila problematiku vlivu vícenásobné plastické deformace na mechanické vlastnosti a strukturu slitiny AlMg3.

V úvodní části, vedle analýzy v současnosti nejčastěji používaných technologií výroby UFG materiálů, jsem rovněž provedla rešerši simulačního programu SimufactForming, který je využíván na katedře mechanické technologie.

V experimentální části jsem provedla protlačení slitiny AlMg3 na tvářecím zařízení využívajícím metodu DRECE. Detailní popis, jak zařízení i metody, jsem uvedla v úvodu teoretické části.

Z dosažených výsledků vlivu SPD procesu na mechanické vlastnosti slitiny AlMg3 se potvrdil předpoklad podstatného zvýšení zpevnění daného materiálu po 1. a 2. průchodu tvářecím zařízením. Ke zvýšení meze kluzu došlo o 76 MPa, meze pevnosti o 24 MPa po druhém průchodu. Tažnost se po druhém průchodu snížila o 19,5 %. I při poklesu tažnosti je slitina AlMg3 vhodná pro následné tvářecí procesy.

Ve spolupráci se Slezskou polytechnickou univerzitou Gliwice jsem provedla metalografickou analýzu, jak na optickém mikroskopu Zeiss Axio Observer Z1, tak i na SEM mikroskopu Zeiss Supra 65 s využitím metody EBSD. Bylo potvrzeno, že po 1. a 2. průchodu dochází k dislokačnímu zpevnění struktury. Podíl nízko-úhlových hranic zrn odpovídám počátečním stádiím tvorby dislokační struktury. Při analýze struktury po 1. a 4. průchodu došlo ke zmenšení střední velikosti zrna z hodnoty $3,07\ \mu\text{m}$ na hodnotu $1,92\ \mu\text{m}$.

V dalších pracích považuji za vhodné zkoumat vliv geometrie tvářecího nástroje a rychlostní parametry zařízení na dosažení větší střední velikosti zrna, a tím i dalšího zvýšení mechanických vlastností slitiny AlMg3.

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Stanislavu Ruzzovi, CSc., za odbornou pomoc a konzultace při vytváření této práce. Poděkování patří také Ing. Zdeňku Štorkánovi za podklady k bakalářské práci.

Citace použité literatury:

- [1] *AGENT: Informační nabídkový a poptávkový portál* [online]. Česká republika, [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://agent.vsb.cz/offers/technologie-vyroby-pasu-plechu-s-ultra-jemnozrnnou-strukturou/>
- [2] RUSZ, Stanislav, Karel MALANÍK, Jan KEDROŇ a Irena SKOTNICOVÁ. *NOVÉ POZNATKY Z VÝVOJE A ZKUŠEBNÍHO PROVOZU PROTOTYPOVÉHO ZAŘÍZENÍ DRECE*. NANOCON [online]. 2009, 2009, 8 stran [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: http://nanocon2014.tanger.cz/files/proceedings/nanocon_09/Lists/Papers/019.pdf
- [3] *Počítačová simulace*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Počítačová_simulace
- [4] *Vývoj nových nekonvenčních tvářecích technologií*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3954-7.
- [5] *Metoda konečných prvků*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_konečných_prvků
- [6] *Introuction to Simufact Forming: Tutorial*. MSC Software Company.
- [7] *ALUNET: Hliníkové profily na míru* [online]. Česká republika: 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-5754>
- [8] SNOPIŇSKI, P., T. TAŇSKI a K. GOŁOMBEK. *AlMg3 - DRECE - Vliv průchodu na strukturu*. 2019, 6 stran.
- [9] *Audi Technology Portal*. Audi Technology Portal [online]. Germany: AUDI, 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.audi-technology-portal.de/en/body/aluminium-bodies/new-audi-space-frame-with-high-proportions-of-aluminum-and-cfrp>
- [10] *ESA Corp: Engineering Science Analysis Corp* [online]. 2015 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.esacorp.com/simufact/>
- [11] *Zeiss: ZEISS Germany* [online]. Germany: 2018 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/microscopy/int/products/light-microscopes/axio-observer-for-materials.html>
- [12] *Vogel Communications Group GmbH & Co. KG* [online]. Germany: 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/version-90-der-umformsimulationsumgebung-simufactforming-a-236528/>